



PENGUJIAN EMISI GAS BUANG MESIN OTTO STASIONER DENGAN BAHAN BAKAR CAMPURAN MINYAK PIROLISIS PLASTIK DAN METANOL

Enzo Wiranta Battra Siahaan^a, Tulus Burhanuddin Sitorus^{b*}, Himsar Ambarita^b, Taufiq Bin Nur^b, Ilmi Abdullah^b, Janter Pangaduan Simanjuntak^c

^aProgram Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas HKBP Nommensen, Jl. Sutomo No.4A, Medan, 20112, Indonesia

^bProgram Studi Ilmu Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Jl. Almamater Kampus USU, Medan, 20155, Indonesia

^cProgram Studi Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Jl. William Iskandar, Kab. Deli Serdang, 20221, Indonesia

*Corresponding authors at: tulus.burhanuddin@usu.ac.id Tel.: +6218-617-9718

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 21 Desember 2025

Direvisi pada 19 Januari 2026

Disetujui pada 23 Februari 2026

Tersedia daring pada 28 Februari 2026

Kata kunci:

Pirolisis plastik, Metanol, Emisi gas buang, Mesin Otto stasioner, Efisiensi pembakaran

Keywords:

Plastic pyrolysis, Methanol, Exhaust emissions, Stationary Otto engine, Combustion efficiency

ABSTRAK

Studi ini menganalisis pengaruh penambahan metanol pada minyak pirolisis limbah plastik terhadap emisi gas buang mesin Otto stasioner sebagai upaya meningkatkan kualitas pembakaran bahan bakar alternatif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh fraksi metanol dalam bahan bakar minyak pirolisis limbah plastik terhadap emisi HC, CO, CO₂, O₂, dan nilai lambda pada mesin Otto stasioner serta mengidentifikasi komposisi campuran optimum berdasarkan kinerja emisi. Pengujian dilakukan pada tiga putaran mesin yaitu 1500 rpm, 2000 rpm, dan 2500 rpm dengan parameter emisi yang diukur meliputi HC, CO, CO₂, O₂, dan nilai lambda. Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran 5% metanol dengan 95% pirolisis plastik memberikan performa emisi terbaik, ditandai dengan kadar HC dan CO yang lebih rendah, CO₂ lebih tinggi, serta O₂ yang lebih rendah dibandingkan campuran lainnya. Sementara itu, pada campuran 10% dan 15% metanol terjadi peningkatan emisi HC dan CO serta penurunan CO₂, yang menandakan pembakaran kurang sempurna. Dengan demikian, penambahan metanol dalam jumlah terbatas mampu meningkatkan efisiensi pembakaran dan menekan emisi berbahaya dari mesin Otto stasioner berbahan bakar campuran pirolisis plastik.

ABSTRACT

Pyrolysis, an alternative energy source made from plastic waste, presents a viable way to address the world's energy problem and environmental issues. The purpose of this study is to examine the exhaust gas emissions of a stationary Otto engine running on pyrolysis oil made from waste plastics mixed with methanol at 5%, 10%, and 15% concentrations. Three engine speeds—1500 rpm, 2000 rpm, and 2500 rpm—were used in the experiments, and important emission parameters such as HC, CO, CO₂, O₂, and the air-fuel equivalency ratio (lambda) were measured. The findings show that, in comparison to blends with higher methanol content, the 5% methanol and 95% pyrolysis oil blend produced the highest emission performance, resulting in reduced HC and CO emissions, higher CO₂ levels, and lower residual O₂. The 10% and 15% methanol mixes, on the other hand, produced lower CO₂ and higher HC and CO emissions, suggesting less thorough combustion. All things considered, the results indicate that a small amount of methanol increases combustion efficiency and lowers toxic emissions, making the 5% blend the best mixture for stationary Otto engines using pyrolysis oil made from plastic waste.

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan limbah plastik sebagai sumber energi alternatif melalui proses pirolisis menjadi krusial dalam menghadapi tantangan lingkungan dan krisis energi global (Programme, 2021; Anggono, 2020). Proses ini mengonversi sampah plastik menjadi bahan bakar cair yang karakteristiknya menyerupai bahan bakar konvensional, sehingga berpotensi mengurangi volume limbah sekaligus menyediakan opsi energi terbarukan (Maithomklang, 2022). Pendekatan ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang terbatas,

tetapi juga memitigasi dampak negatif penumpukan limbah plastik terhadap lingkungan (Tovar, 2024). Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa minyak pirolisis plastik dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif atau campuran dalam mesin pembakaran internal (Pumpuang, 2024; Suchocki, 2024)

Meskipun studi mengenai minyak pirolisis plastik dan bahan bakar beralkohol telah banyak dilakukan, kajian mengenai karakteristik emisi gas buang mesin Otto stasioner yang menggunakan campuran minyak pirolisis limbah plastik dan metanol masih relatif terbatas, khususnya pada variasi putaran mesin rendah hingga menengah. Padahal, mesin Otto stasioner banyak digunakan pada sektor rumah tangga dan industri kecil sebagai sumber energi mekanik, sehingga aspek emisi menjadi faktor penting dalam evaluasi kelayakan bahan bakar alternatif (Sunaryo dkk., 2020; Kalghatgi dkk., 2021). Berdasarkan celah penelitian tersebut, studi ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kadar metanol dalam bahan bakar minyak pirolisis limbah plastik terhadap emisi gas buang mesin Otto stasioner, meliputi HC, CO, CO₂, O₂, dan nilai lambda, guna memperoleh komposisi campuran yang menghasilkan pembakaran paling efisien dan emisi paling rendah. Penambahan metanol sebagai aditif pada bahan bakar pirolisis plastik berpotensi meningkatkan kualitas pembakaran dan mengurangi emisi gas buang berbahaya, mengingat metanol memiliki kandungan oksigen tinggi dan sifat pembakaran yang bersih (Guo, 2025). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik emisi gas buang mesin Otto stasioner yang menggunakan bahan bakar campuran minyak pirolisis limbah plastik dan metanol, yang meliputi emisi hidrokarbon (HC), karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), oksigen (O₂), serta nilai lambda, guna memperoleh data empiris sebagai dasar pengembangan bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan. Secara teknis, minyak pirolisis dari limbah plastik, seperti polipropilena, memiliki kemiripan sifat dengan bahan bakar minyak bumi (Asokan dkk., 2019), namun penambahan aditif seperti metanol diharapkan dapat mengoptimalkan karakteristik pembakaran untuk mencapai emisi yang lebih rendah dan efisiensi yang lebih tinggi (Arjham dkk., 2022).

Perbandingan berbagai komposisi campuran bahan bakar dilakukan untuk mengidentifikasi formulasi optimum yang mampu menurunkan emisi gas buang tanpa mengorbankan performa mesin, dengan mempertimbangkan bahwa limbah plastik memiliki tingkat degradasi alami yang sangat lambat sehingga berpotensi menimbulkan dampak lingkungan jangka panjang (Arahim dkk., 2020). Pemanfaatan limbah plastik melalui proses pirolisis untuk menghasilkan bahan bakar cair telah terbukti menjadi solusi yang menjanjikan dalam mengelola limbah dan menciptakan sumber energi alternatif (Roni, 2020).

2. METODE PENELITIAN

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini mengadopsi pendekatan eksperimental kuantitatif. Desain eksperimen ini melibatkan pengujian terukur terhadap karakteristik emisi gas buang dan parameter performa termodinamika pada mesin Otto stasioner. Eksperimen dilakukan dengan memvariasikan komposisi campuran bahan bakar yang terdiri dari minyak pirolisis plastik dan metanol. Pendekatan ini bertujuan untuk mengumpulkan data numerik yang akurat guna menganalisis dampak setiap variasi campuran terhadap luaran mesin.

2.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian eksperimental ini dilaksanakan di Laboratorium Konversi Energi, Departemen Teknik Mesin, Universitas Sumatera Utara dan Laboratorium Teknik Kimia, Politeknik Negeri Lhokseumawe selama 3 Bulan.

2.3 Bahan Bakar Penelitian

Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini meliputi tiga komponen utama:

1. Minyak Pirolisis Limbah Plastik (PPO): Diperoleh melalui proses pirolisis termal dari limbah plastik. Karakteristik fisik PPO, termasuk densitas, viskositas, nilai kalor, dan bilangan oktan, dikarakterisasi secara ekstensif untuk memverifikasi kesesuaiannya sebagai komponen bahan bakar referensi (*baseline*) untuk perbandingan (dapat dilihat pada Gambar 1 dan Tabel 1).



Gambar 1: Minyak Pirolisis Limbah Plastik (PPO)

Tabel 1: Properti Sifat Fisik Kandungan Bahan Bakar Minyak Pirolisis Limbah Plastik dengan Zat Aditif Metanol

Parameter	Sampel				Metode
	PM 0	PM 5	PM 10	PM 15	
Densitas [kg/m ³]	0,786021	0,755955	0,670051	0,665756	
Viskositas Kinematik [cP]	0,878968681	0,833547115	0,796718819	0,745159203	SNI 3506:2017
Titik Didih [°C]	43,4	45,3	47,4	50,7	
Titik Nyala [°C]	50,9	52,7	67,5	69,6	
Nilai Kalor [J/Gr]	42156	43180	45216	46015	ASTM D 4809 - 06
Nilai Oktan	71,6	83,5	85,1	85,2	ASTM D 2699

Catatan: PM0 (PPO 100%) (tanpa campuran metanol), PM5 (PPO 95% : Metanol 5%), PM10 (PPO 90% : Metanol 10%) dan PM 15 (PPO 85% : Metanol 15%)

- Metanol (CH_3OH), berfungsi sebagai aditif dengan konsentrasi bervariasi, dicampurkan ke dalam kombinasi PPO. Metanol dipilih karena kandungan oksigennya yang tinggi dan sifat pembakaran yang relatif bersih, yang berpotensi mengoptimalkan karakteristik pembakaran (Dapat dilihat pada tabel 2).

Tabel 2: Karakteristik metanol *pro analysis*

Karakteristik	Nilai
Titik beku	-97,8°C
Titik didih (pada 760 mmHg)	64,7°C
Densitas (pada 760 mmHg)	0,782 g/ml
Indeks bias, pada 40°C	1,3287
Viskositas, pada 30°C	0,5142 Cp
Temperatur kritis	78,5°C
Panas spesifik, liquid (pada suhu 25 - 30°C)	0,605 – 0,609 kal/g
Panas spesifik, liquid (pada suhu 100 - 200°C)	12,2-14,04 kal/g.mol
Panas penguapan (pada suhu Panas spesifik, liquid (pada suhu 64,7°C)	8430 kal/mol
Flash Point (°C)	11 – 12°C
Kelarutan dalam air	Miscible

2.3.1 Preparasi Campuran Bahan Bakar

Berbagai formulasi campuran bahan bakar akan dipersiapkan dengan proporsi volume tertentu yaitu volume spesifik untuk metanol 5%, 10% dan 15%. Beberapa konfigurasi campuran yang akan diuji meliputi:

- Campuran PPO dan Metanol dengan rasio volume spesifik PM0 (PPO 100%) (tanpa campuran metanol), PM5 (PPO 95% : Metanol 5%), PM10 (PPO 90% : Metanol 10%) dan PM 15 (PPO 85% : Metanol 15%), di mana persentase menunjukkan proporsi PPO dalam campuran.
- Homogenitas setiap campuran akan dipastikan sebelum pengujian, dan penyimpanan akan dilakukan dalam wadah tertutup rapat untuk mencegah evaporasi dan kontaminasi.

2.4 Peralatan Penelitian

Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- Mesin Uji: Sebuah mesin Otto stasioner satu silinder dengan merk *Mesin Honda GX-160 H2/Jialing* digunakan sebagai objek pengujian dan dapat dilihat pada Gambar 2.

Spesifikasi Mesin :

Tenaga Mesin	: 5,5 HP
Putaran Mesin	: 3600 rpm
Torsi Maksimum Mesin	: 10,3 Nm/2500 rpm
Diameter × Langkah Piston	: 68 × 45 mm
Tipe Oil	: SAE 10W – 30
Kapasitas Mesin	: 163 cc
Sistem Pengapian Mesin	: <i>Transistorized Magneto Ignition</i>
Perb. Kompresi Pembakaran	: 8,5

**Gambar 2:** *Mesin Honda GX-160 H2/Jialing*

- Sistem Pengukuran Emisi Gas Buang:

Gas Analyzer Type RB-654GA bertujuan untuk mengukur konsentrasi emisi gas buang, termasuk karbon monoksida, karbon dioksida (CO_2), hidrokarbon tak terbakar, dan oksida nitrogen. Alat ini akan dikalibrasi sesuai standar pabrikan sebelum setiap sesi pengujian. Spesifikasi dari alat pengukuran emisi gas buang yaitu *Gas Analyzer Type RB-654GA* dapat dilihat pada Gambar 3 dan Tabel 3.

Tabel 3: Spesifikasi *Gas Analyzer Type RB-654GA*

Parameter	Range	Resolution
O_2	0 -25%	0,01 %
CO	0 – 9,999%	0,01 %
CO_2	0 – 20%	0,01 %
HC	0 – 9999 ppm	1 ppm
NOx	0 – 4000 ppm	1 ppm
AFR	0,0 – 99,0	0,01



Gambar 3: Gas Analyzer Type RB-654G

- Sistem akuisisi data menggunakan perangkat DAQ [NI USB-6009] yang terhubung dengan sensor putaran mesin, sensor suhu, sensor aliran bahan bakar, serta gas analyzer RB-654GA. Data diambil secara *real-time* dengan resolusi 64 bit dan disimpan menggunakan perangkat lunak *excel logger* untuk keperluan analisis emisi gas buang.

2.5 Prosedur Penelitian

Prosedur eksperimental diawali dengan tahap persiapan dan kalibrasi sistem. Mesin Otto stasioner dipanaskan hingga mencapai kondisi operasi stabil agar seluruh parameter kerja berada pada keadaan tunak. Seluruh instrumen pengukuran, khususnya gas analyzer, dikalibrasi secara berkala sesuai dengan prosedur standar untuk menjamin akurasi dan konsistensi data emisi yang diperoleh selama pengujian.

Selanjutnya, dilakukan pengujian *baseline* menggunakan bahan bakar minyak pirolisis plastik (PPO). Mesin dioperasikan pada parameter putaran yang telah ditentukan, dan data emisi gas buang dicatat sebagai acuan awal. Setelah itu, pengujian variasi bahan bakar dilakukan secara berurutan untuk setiap formulasi campuran. Setiap kali terjadi penggantian bahan bakar, mesin dijalankan selama periode tertentu guna memastikan proses purging sistem bahan bakar dan stabilisasi kondisi operasi dengan bahan bakar baru. Pengambilan data emisi meliputi parameter CO, CO₂, HC, dan lambda pada kondisi operasi yang identik dengan pengujian *baseline*.

Pada tahap persiapan penelitian, variasi komposisi campuran bahan bakar ditetapkan sebagai parameter utama yang akan diuji. Campuran bahan bakar disusun berdasarkan proporsi volume minyak pirolisis limbah plastik (PPO) dan metanol, yang meliputi PPOM0 (PPO 100%), PPOM5 (PPO 95% : metanol 5%), PPOM10 (PPO 90% : metanol 10%), dan PPOM15 (PPO 85% : metanol 15%). Parameter yang diamati dalam penelitian ini adalah emisi gas buang, yang mencakup konsentrasi hidrokarbon (HC), karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), oksigen (O₂), serta nilai lambda yang dinyatakan dalam satuan ppm atau persentase volume. Selama pengujian, putaran mesin dikendalikan pada variasi 1500 rpm, 2000 rpm, dan 2500 rpm untuk memastikan bahwa perbedaan karakteristik emisi yang diperoleh terutama dipengaruhi oleh variasi komposisi campuran bahan bakar.

Pada penelitian ini, setiap variasi campuran bahan bakar diuji sebanyak tiga kali pengulangan untuk menjamin reliabilitas dan validitas statistik. Data eksperimen direkam secara elektronik dan diverifikasi melalui pencatatan manual, sehingga hasil pengukuran emisi dapat dianalisis secara konsisten dan ilmiah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Emisi Gas Buang pada Mesin Otto Stasioner

Tabel ringkasan hasil emisi gas buang menyajikan perbandingan karakteristik emisi dari campuran bahan bakar metanol dan pirolisis plastik pada variasi komposisi 5%:95%, 10%:90%, dan 15%:85% dengan putaran mesin 1500 rpm, 2000 rpm, dan 2500 rpm. Parameter utama yang diamati meliputi konsentrasi gas buang HC, CO, CO₂, O₂, serta nilai lambda (λ) sebagai indikator efisiensi pembakaran. Hasil emisi gas buang pada mesin otto stasioner dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4: Hasil Emisi Gas Buang

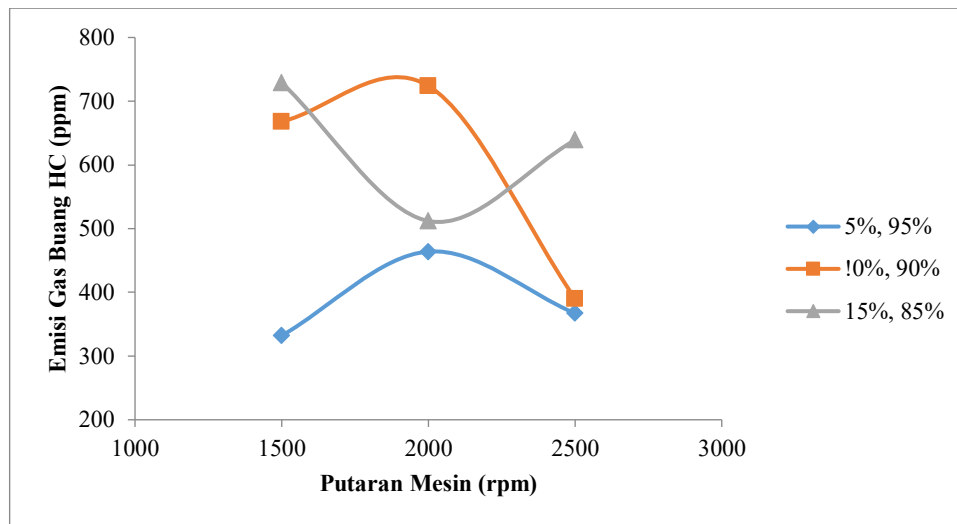
Campuran Bahan Bakar (Metanol : Pirolisis)	RPM	HC (ppm)	CO (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	Lambda (λ)
5%:95%	1500	332	3,05	5,9	7,72	1,39
	2000	464	3,04	5,9	7,72	1,39
	2500	367	4,48	5,7	6,38	1,194
10%:90%	1500	668	3,14	5,7	7,99	1,39
	2000	724	4,26	5,5	7,35	1,252
	2500	390	3,13	5,7	7,2	1,87
15%:85%	1500	729	4,32	5,1	7,43	1,262
	2000	512	4,36	5,1	6,74	1,217
	2500	639	4,6	5,2	6,52	1,178

3.2 Analisis Emisi Gas Hidrokarbon (HC)

Berdasarkan hasil pengujian, konsentrasi HC menunjukkan variasi yang cukup signifikan pada setiap campuran bahan bakar. Pada campuran 5% metanol dan 95% pirolisis plastik, kadar HC relatif lebih rendah dibandingkan dengan campuran 10% dan 15% metanol. Hal ini terlihat jelas pada putaran 1500 rpm, di mana HC mencapai 668 ppm pada 10% campuran, sedangkan pada 5% hanya sekitar 332 ppm. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan metanol yang berlebihan justru meningkatkan sisa pembakaran tidak sempurna akibat kandungan oksigen internal dalam molekul metanol (Prasetya & Suryanto, 2022).

Selain itu, pada putaran yang lebih tinggi (2000 rpm dan 2500 rpm), tren peningkatan HC juga terlihat pada campuran 15% metanol. Nilai HC mencapai 729 ppm pada 2000 rpm, lebih tinggi dibandingkan 512 ppm pada campuran 10% metanol. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar metanol, semakin besar kecenderungan pembentukan HC akibat pendinginan ruang bakar oleh sifat pendingin

(cooling effect) metanol yang memperlambat pembakaran sempurna (Najafi dkk., 2015). Hasil emisi gas hidrokarbon (HC) yang dihasilkan oleh mesin otto stasioner dapat dilihat pada Gambar 4.

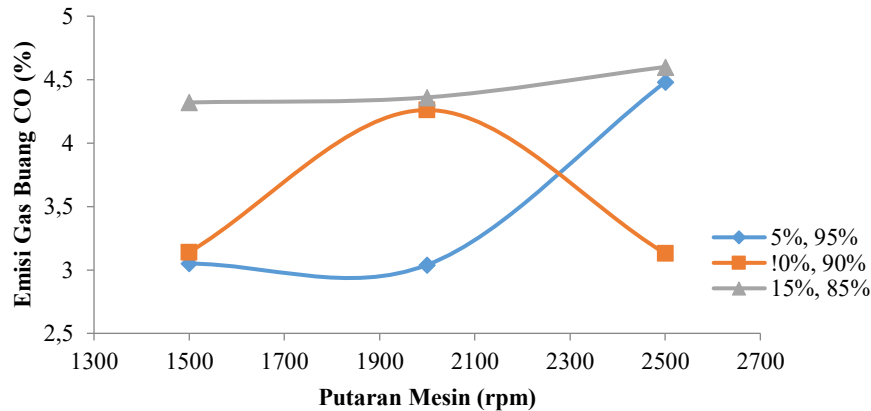


Gambar 4: Grafik Perbandingan Emisi Gas Hidrokarbon Berdasarkan Variasi Konsentrasi Metanol dan Putaran Mesin

3.3 Analisis Emisi Gas Karbon Monoksida (CO)

Emisi CO cenderung tinggi pada campuran 10% dan 15% metanol dibandingkan 5%. Pada 1500 rpm, kadar CO tercatat 4,26% untuk 10% metanol dan 4,32% untuk 15% metanol, sedangkan hanya 3,05% pada campuran 5%. Hal ini menunjukkan bahwa pembakaran dengan campuran lebih tinggi metanol menghasilkan lebih banyak CO akibat suplai oksigen yang tidak sebanding dengan jumlah bahan bakar yang dibakar (Kim, 2021).

Pada putaran 2000 rpm dan 2500 rpm, pola serupa terlihat, di mana CO meningkat dengan penambahan metanol. Konsentrasi CO tertinggi tercatat pada campuran 15% metanol di 2000 rpm sebesar 4,36%, sedangkan campuran 5% hanya menghasilkan 3,04%. Hal ini konsisten dengan karakteristik pembakaran metanol yang dapat menghasilkan CO lebih tinggi bila pencampuran udara-bahan bakar tidak optimal (Shin, 2022). Hasil emisi gas Karbon Monoksida (CO) yang dihasilkan oleh mesin otto stasioner dapat dilihat pada Gambar 5.

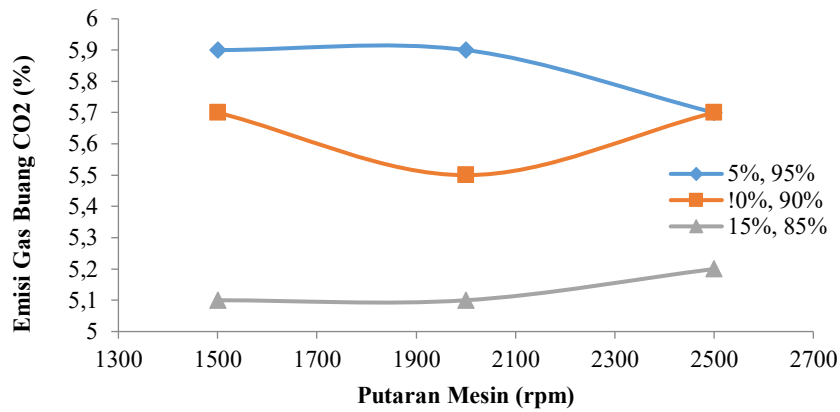


Gambar 5: Grafik Perbandingan Emisi Gas Karbon Monoksida (CO) Berdasarkan Variasi Konsentrasi Metanol dan Putaran Mesin

3.4 Analisis Emisi Gas Karbon Dioksida (CO₂)

Gas CO₂ merupakan indikator pembakaran sempurna. Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran 5% metanol menghasilkan konsentrasi CO₂ lebih tinggi dibandingkan campuran lainnya. Pada 1500 rpm, CO₂ mencapai 5,9% untuk campuran 5% metanol, lebih tinggi dari 5,5% pada campuran 10% metanol dan 5,1% pada 15% metanol. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan metanol berlebih justru menurunkan efisiensi pembakaran (Suresh dkk., 2018;).

Pada 2500 rpm, tren serupa juga terlihat, dengan CO₂ sebesar 5,7% pada 5% metanol campuran, sedangkan hanya 5,2% pada 15% metanol campuran. Hal ini menegaskan bahwa kadar metanol yang lebih rendah dalam campuran dengan pirolisis plastik mampu meningkatkan pembakaran sempurna dibandingkan dosis yang lebih tinggi (Guo, 2025). Hasil emisi gas karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan oleh mesin otto stasioner dapat dilihat pada Gambar 6.

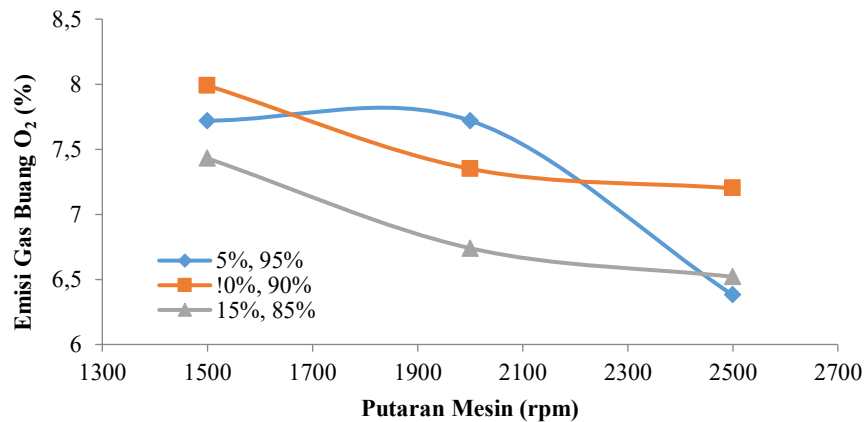


Gambar 6: Grafik Perbandingan Emisi Gas Karbon Dioksida (CO₂) Berdasarkan Variasi Konsentrasi Metanol dan Putaran Mesin

3.5 Analisis Gas Oksigen (O₂)

Konsentrasi O₂ dalam gas buang menunjukkan pola kebalikan dari CO₂. Pada campuran 5% metanol, nilai O₂ lebih rendah dibandingkan 10% dan 15%, mengindikasikan bahwa lebih banyak oksigen digunakan dalam pembakaran. Misalnya, pada 1500 rpm O₂ tercatat 7,72% untuk 5% campuran, sedangkan naik menjadi 7,35% pada 10% dan 7,43% pada 15% (Sunaryo dkk., 2020).

Pada putaran tinggi (2500 rpm), kondisi serupa terlihat, dengan O₂ sebesar 6,38% untuk 5% campuran dan meningkat hingga 6,74% untuk 15% metanol. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan metanol, semakin banyak oksigen sisa yang tidak terbakar, sehingga efisiensi pembakaran menurun (Sok, 2021 ; Sunaryo dkk., 2020). Hasil emisi gas Oksigen (O₂) yang dihasilkan oleh mesin otto stasioner dapat dilihat pada Gambar 7.

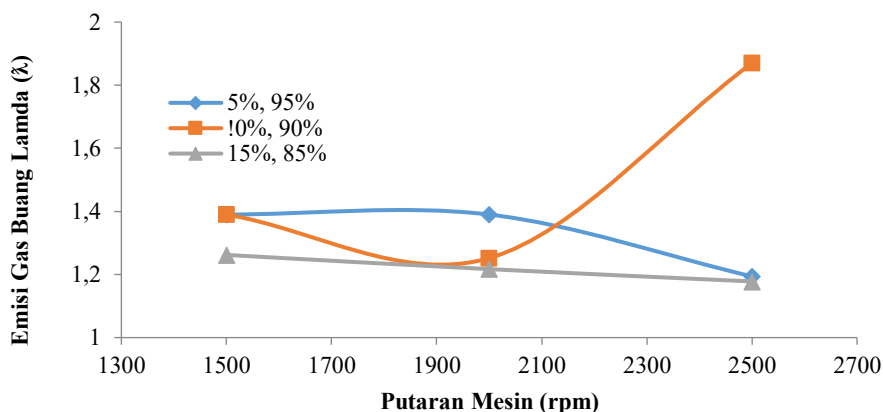


Gambar 7. Grafik Perbandingan Emisi Gas Oksigen (O₂) Berdasarkan Variasi Konsentrasi Metanol dan Putaran Mesin

3.5 Analisis Lambda (λ)

Nilai lambda menggambarkan perbandingan udara-bahan bakar (AFR) relatif terhadap stoikiometri. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai lambda meningkat seiring bertambahnya kadar metanol dalam campuran. Pada 1500 rpm, campuran 5% memiliki $\lambda = 1,390$, sedangkan campuran 15% mencapai $\lambda = 1,262$. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan metanol cenderung membuat campuran lebih miskin (*lean mixture*) (Arjuna dkk., 2017).

Pada putaran 2000 rpm, pola serupa juga teramati dengan $\lambda = 1,542$ pada 5% metanol dan 1,217 pada 15%. Hal ini konsisten dengan karakteristik metanol yang memiliki kandungan oksigen intrinsik lebih tinggi dibandingkan pirolisis plastik, sehingga meningkatkan rasio udara-bahan bakar semu (*apparent AFR*) pada konsentrasi rendah, namun pada konsentrasi lebih tinggi menyebabkan ketidakseimbangan dalam pencampuran (Azhar, 2023). Hasil emisi lambda (λ) yang dihasilkan oleh mesin otto stasioner dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Perbandingan Nilai Lamda (λ) Berdasarkan Variasi Konsentrasi Metanol dan Putaran Mesin

3.6 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi campuran bahan bakar minyak pirolisis plastik dan metanol memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik emisi gas buang mesin Otto stasioner. Variasi kadar metanol dalam campuran memengaruhi proses pembakaran, baik dari sisi kestabilan nyala api maupun tingkat kesempurnaan reaksi oksidasi di dalam ruang bakar. Campuran dengan kandungan metanol rendah, yaitu 5%, menghasilkan pembakaran yang lebih stabil dan efisien dibandingkan campuran dengan kandungan metanol lebih tinggi. Kondisi ini ditunjukkan oleh rendahnya emisi hidrokarbon (HC) dan karbon monoksida (CO), serta tingginya konsentrasi karbon dioksida (CO_2) yang mencerminkan pembakaran lebih sempurna. Fenomena tersebut sejalan dengan teori bahwa metanol sebagai bahan bakar beroksigen mampu meningkatkan proses oksidasi bahan bakar ketika digunakan dalam kadar terbatas. Kandungan oksigen dalam molekul metanol membantu mempercepat reaksi pembakaran dan mengurangi pembentukan senyawa sisa yang tidak terbakar.

Secara kinetika kimia, keberadaan oksigen terikat dalam metanol meningkatkan pembentukan radikal aktif seperti OH dan O yang berperan penting dalam reaksi oksidasi CO menjadi CO_2 . Pada fraksi rendah, kontribusi oksigen internal ini cukup untuk memperbaiki kualitas pembakaran tanpa menimbulkan gangguan termal yang signifikan di dalam ruang bakar (Ge dkk., 2022). Selain itu, peningkatan angka oktan akibat penambahan metanol memperbaiki karakteristik pembakaran premixed dan mengurangi kecenderungan knocking maupun misfire, sehingga siklus pembakaran berlangsung lebih konsisten dan menghasilkan emisi yang lebih rendah (Prasetya & Suryanto, 2022)..

Sebaliknya, peningkatan fraksi metanol hingga 10% dan 15% justru menurunkan kualitas pembakaran. Emisi HC dan CO meningkat, sementara konsentrasi CO_2 menurun, yang mengindikasikan terjadinya pembakaran tidak sempurna (Wahyudi & Pranoto, 2025). Penurunan kualitas pembakaran ini dipengaruhi oleh sifat fisik metanol yang memiliki panas penguapan tinggi. Selama proses atomisasi dan evaporasi, metanol menyerap energi panas yang cukup besar dari campuran udara–bahan bakar, sehingga menurunkan temperatur lokal di dalam ruang bakar. Penurunan temperatur tersebut memperlambat laju reaksi kimia dan menghambat oksidasi hidrokarbon secara menyeluruh. Akibatnya, sebagian bahan bakar tidak teroksidasi sempurna dan terdeteksi sebagai peningkatan emisi HC dan CO (Mirkarimi dkk., 2022; Z. Zhang dkk., 2022).

Selain efek pendinginan, peningkatan fraksi metanol juga memengaruhi rasio udara–bahan bakar efektif karena kebutuhan udara stoikiometri metanol lebih rendah dibandingkan hidrokarbon konvensional. Tanpa penyesuaian sistem suplai bahan bakar, penambahan metanol dalam jumlah lebih besar cenderung menghasilkan campuran yang lebih miskin. Hal ini tercermin dari meningkatnya kadar O_2 sisa dan nilai lambda ($\lambda > 1$). Kondisi campuran yang terlalu miskin dapat menyebabkan instabilitas nyala api dan fenomena *flame quenching*, terutama pada daerah dekat dinding silinder, sehingga pembakaran menjadi parsial dan efisiensi oksidasi menurun (K dkk., 2021).

Dari sudut pandang termodinamika pembakaran, terdapat keseimbangan antara efek oksigenasi dan efek pendinginan. Pada fraksi 5%, keuntungan kimia berupa peningkatan oksidasi karbon masih lebih dominan dibandingkan kerugian termal akibat pendinginan. Namun pada fraksi 10% dan 15%, efek pendinginan dan pergeseran rasio udara–bahan bakar menjadi faktor pembatas utama yang menurunkan temperatur puncak pembakaran dan efisiensi konversi energi kimia menjadi kerja mekanis.

Secara keseluruhan, campuran 5% metanol dengan 95% minyak pirolisis plastik menghasilkan performa emisi terbaik, ditandai dengan HC dan CO yang lebih rendah, CO_2 yang lebih tinggi, O_2 yang lebih rendah, serta nilai lambda yang mendekati stoikiometri. Temuan ini menunjukkan adanya fraksi optimum metanol dalam sistem campuran, di mana stabilitas pembakaran, efisiensi oksidasi, dan kontrol emisi berada pada kondisi paling seimbang. Oleh karena itu, penggunaan metanol dalam jumlah terbatas direkomendasikan sebagai formulasi paling rasional untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan menekan emisi berbahaya pada mesin Otto stasioner berbahan bakar minyak pirolisis plastik (Y. Zhang dkk., 2017).

4. KESIMPULAN

Komposisi campuran minyak pirolisis plastik (PPO) dan metanol memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik emisi gas buang mesin Otto stasioner pada berbagai putaran mesin. Peningkatan fraksi metanol dalam campuran memengaruhi proses pembakaran, yang tercermin dari perubahan konsentrasi HC, CO, CO_2 , O_2 , serta nilai lambda sebagai indikator kesempurnaan pembakaran dan rasio udara–bahan bakar. Campuran dengan kadar metanol rendah menunjukkan kualitas pembakaran yang lebih baik dibandingkan fraksi metanol yang lebih tinggi. Kondisi ini ditandai dengan kecenderungan penurunan emisi hidrokarbon dan karbon monoksida serta peningkatan pembentukan karbon dioksida, yang mengindikasikan proses oksidasi yang lebih efektif. Sebaliknya, peningkatan kadar metanol di atas fraksi tertentu menyebabkan kecenderungan pembakaran kurang sempurna akibat efek pendinginan dan perubahan rasio udara–bahan bakar, sehingga emisi HC dan CO meningkat. Secara keseluruhan, penambahan metanol dalam jumlah terbatas terbukti mampu meningkatkan efisiensi pembakaran dan menekan emisi berbahaya pada mesin Otto stasioner berbahan bakar minyak pirolisis plastik. Komposisi campuran dengan fraksi metanol rendah direkomendasikan sebagai formulasi yang lebih optimal untuk mendukung pemanfaatan bahan bakar alternatif berbasis limbah plastik secara lebih ramah lingkungan dan efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggono, W. (2020). *Waste plastic degradation: Environmental impacts and energy potential*.
- Arahim, A. A., Widayat, W., & Hadiyanto, H. (2020). Pengaruh Katalis Genteng Tanah Liat dalam Proses Produksi Bahan Bakar Cair dari Limbah Ban Bekas dengan Proses Pirolisis. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 1(2), 62–67.
- Arjhan, W., Liplap, P., Maithomklang, S., Thammakul, K., Chuepeng, S., & Sukjit, E. (2022). Distilled Waste Plastic Oil as Fuel for a Diesel Engine: Fuel Production, Combustion Characteristics, and Exhaust Gas Emissions. *Acs Omega*.
- Arjuna, J., Sitorus, T. B., Hazwi, M., & Sitio, A. (2017). Performansi mesin otto yang menggunakan bahan bakar biogas dari limbah cair sawit. *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, 10(1), 17–22.
- Asokan, M. A., Senthur Prabu, S., Bade, P. K. K., Nekkanti, V. M., & Gutta, S. S. G. (2019). Performance, combustion and emission characteristics of juliflora biodiesel fuelled DI diesel engine. *Energy*, 173, 883–892.
- Azhar, F. A. (2023). Pengaruh Perubahan Sistem Pemasukan Bahan Bakar dan Rasio Kompresi Motor Bakar 4-Tak Single Cylinder terhadap Torsi dan Daya. *Jurnal Teknik Terapan*, 2(1), 23–30.
- Ge, S., Ganesan, R., Sekar, M., Xia, C., Shanmugam, S., Alsehli, M., & Brindhadevi, K. (2022). Blending and emission characteristics of biogasoline produced using CaO/SBA-15 catalyst by cracking used cooking oil. *Fuel*, 307(41), 121861.
- Guo, L. (2025). *Methanol as an additive in internal combustion engines: Emission and performance characteristics*.
- K, S., Alagar, K., R, V. K., VJ, M. P., & P, M. (2021). Performance and emission characteristics of diesel engine fueled with ternary blends of linseed and rubber seed oil biodiesel. *Fuel*, 285.
- Kalghatgi, G., Johansson, B., & Head, R. (2021). Fuel effects on knock, efficiency and heat release in spark ignition engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 83, 100901.
- Kim, S. (2021). Effect of boosting on a performance and emissions in a port fuel injection natural gas engine with variable intake and exhaust valve timing. *Energy Reports*, 7, 4941–4950.
- Maithomklang, S. (2022). *Pyrolysis of plastic waste for alternative fuel production*.
- Mirkarimi, S. M. R., Bensaid, S., & Chiaramonti, D. (2022). Conversion of mixed waste plastic into fuel for diesel engines through pyrolysis process: A review. *Applied Energy*, 327, 120040.
- Najafi, G., Ghobadian, B., Yusaf, T., Ardebili, S. M. S., & Mamat, R. (2015). Optimization of performance and exhaust emission parameters of a SI (spark ignition) engine with gasolineethanol blended fuels using response surface methodology. *Energy*, 90, 1815–1829.
- Prasetya, E., & Suryanto, H. (2022). Pengaruh Campuran Bahan Bakar Peralite dan Metanol Terhadap Emisi Gas Buang Dan Performa Mesin Sepeda Motor Empat Langkah. *JME (Jurnal Mekanika Dan Energi)*, 1(1 SE-Articles).
- Programme, U. N. E. (2021). *From Pollution to Solution: A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution*. UNEP.
- Pumpuang, P. (2024). *Engine performance and emission analysis of plastic pyrolysis fuels*.
- Roni, M. S. (2020). *Plastic waste management through pyrolysis technology: A sustainable approach*.
- Shin, J. Y. (2022). Effect of late intake valve closing on the particle number emissions of a turbocharged gasoline direct injection engine. *Fuel Processing Technology*, 230.
- Sok, R. (2021). Experimental Investigation On The Effects Of Direct Fuel Injection Into Low-O2 Recompression Interval Of An Hcci Engine. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)* (Vol. 8).
- Suchocki, R. (2024). *Engine emission behavior of pyrolysis-derived fuels*.
- Sunaryo, Effendy, M., & Julianto, E. (2020). Analisis Performa dan Karakteristik Emisi Gas Buang Motor Bensin dari Penggunaan Bahan Bakar Campuran Plastic Oil-Peralite. *Rotasi*, 22(2), 133–141.
- Suresh, M., Jawahar, C. P., & Richard, A. (2018). A review on biodiesel production, combustion, performance, and emission characteristics of non-edible oils in variable compression ratio diesel engine using biodiesel and its blends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92(April 2017), 38–49.

-
- Tovar, C. (2024). *Global energy transition and the role of waste-to-fuel technologies*.
- Wahyudi, I., & Pranoto, H. (2025). *Bakar Dan Emisi Gas Buang Dengan Pendekatan*. 06(02), 30–38.
- Zhang, Y., Wu, H., Li, J., & Wang, Q. (2017). Optimization of alcohol blending ratio in waste plastic fuel for improved combustion. *Applied Energy*, 204, 835–844.
- Zhang, Z., Tian, J., & Huang, Y. (2022). Experimental investigation on combustion duration and knock tendency of SI engines fueled with oxygenated fuels. *Energy*, 239, 122338.