

PENGARUH VARIASI CAMPURAN BIODIESEL MINYAK JELANTAH TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN PADA MESIN DIESEL

Berthy Pelasula¹⁾, R.R. Lekatompessy²⁾, NJM. Nanulaitta^{3)*}, Graciadiana I Huka⁴⁾, Hendry de Fretes⁵⁾
^{1,2,3,4,5)}Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ambon

bertop31@gmail.com, royleka1511@gmail.com, nevadario12@gmail.com,
graciahuka71@gmail.com, valentinodef@gmail.com

ABSTRACT

This study investigates the transient behavior of internal combustion engines (SI Engine) using various ethanol-gasoline blends (E0 to E10). The research aims to analyze the impact of bioethanol concentration on engine stability across two operational regimes: low speed (1500 RPM) simulating idle conditions and medium speed (2000 RPM) representing transition to workload. The experimental method involved sequential microscopic recording of crankshaft fluctuations at specific intervals. The results demonstrate that at 1500 RPM, E10 significantly improves operational stability, reducing fluctuations to only 10 RPM compared to 60 RPM for E0, due to the oxygenated nature of ethanol. Conversely, at 2000 RPM, higher ethanol concentrations (E8 and E10) lead to performance deficits and unstable combustion phases. This is attributed to the lower heating value (LHV) of ethanol, which results in a 3% to 4% reduction in chemical energy input, and high latent heat of vaporization that causes intake cooling and non-uniform vaporization.

Key word : bioethanol, SI engine, engine stability, fluctuations RPM

ABSTRAK

Penelitian ini menyelidiki perilaku transien mesin pembakaran dalam (*SI Engine*) menggunakan berbagai campuran etanol-bensin (E0 hingga E10). Tujuan penelitian adalah menganalisis dampak konsentrasi bioetanol terhadap stabilitas mesin pada dua rezim operasional: putaran rendah (1500 RPM) yang mensimulasikan kondisi *idle* dan putaran menengah (2000 RPM) yang merepresentasikan transisi beban kerja. Metode eksperimen yang digunakan melibatkan perekaman mikroskopis sekuensial terhadap fluktuasi poros engkol pada interval waktu tertentu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada 1500 RPM, campuran E10 secara signifikan meningkatkan stabilitas operasional dengan mereduksi fluktuasi hingga hanya 10 RPM dibandingkan 60 RPM pada E0, berkat sifat *oxygenated* dari etanol. Sebaliknya, pada 2000 RPM, konsentrasi etanol yang lebih tinggi (E8 dan E10) menyebabkan defisit performa dan fase pembakaran yang tidak stabil. Hal ini disebabkan oleh rendahnya nilai kalor (LHV) etanol yang mengurangi asupan energi kimia sebesar 3% hingga 4%, serta panas laten penguapan yang tinggi yang memicu pendinginan saluran masuk dan penguapan yang tidak seragam.

Kata kunci: *bioetanol; SI engine; stabilitas operasional; fluktuasi RPM.*

PENDAHULUAN

Minyak kelapa bekas atau minyak jelantah merupakan sumber daya yang melimpah namun sering kali dianggap sebagai sampah yang membebani lingkungan. Minyak goreng yang beredar di pasar Indonesia umumnya berasal dari berbagai sumber seperti kelapa sawit (CPO), kelapa (PKO/CNO), bunga matahari, kedelai, dan bijih jarak. Khusus untuk minyak yang berasal dari PKO (Palm Kernel Oil), terdapat fraksi padat (stearin) yang mencapai 50% dan fraksi cair (olein). Fraksi stearin yang padat biasanya digunakan untuk margarin dan produk roti, namun jika akan digunakan sebagai bahan bakar diesel, memerlukan pemanasan agar dapat dialirkan secara efektif dalam sistem injeksi.

Pemanfaatan minyak jelantah sebagai bahan baku biodiesel menawarkan keuntungan ekonomi yang signifikan. Biaya produksi biodiesel dari minyak jelantah diperkirakan 35% lebih murah dibandingkan dengan biodiesel dari CPO murni (Aminatus Sa'diyah, et al). Selain itu, dari sisi ekologis, penggunaan minyak jelantah dapat menurunkan emisi CO₂ hingga 91,7% dibandingkan dengan solar konvensional (Aminatus Sa'diyah, et al. 2024). Di Indonesia, potensi ketersediaan minyak jelantah sangat besar; data menunjukkan bahwa rata-rata satu liter minyak goreng yang dikonsumsi rumah tangga akan menghasilkan sekitar 0,4 liter minyak jelantah (Sudaryadi, et al. 2022). Di lima kota besar di Jawa dan Bali saja, potensi minyak jelantah dari sektor rumah tangga dan usaha

mikro mencapai ribuan kiloliter per bulan (Sudaryadi, et al. 2022). Namun, penggunaan minyak kelapa bekas dalam bentuk aslinya pada mesin diesel tidak praktis karena viskositasnya yang tinggi, volatilitas rendah, dan struktur molekul yang besar (Hutomo Jiwo Satrio, et al. 2024). Senyawa dalam minyak nabati mentah dapat menyebabkan kerusakan permanen pada mesin melalui pembentukan deposit pada nozzle injektor, penyumbatan saringan bahan bakar, dan pengenceran minyak pelumas. Selain itu, minyak goreng bekas sering mengandung asam lemak bebas (FFA) yang tinggi sebagai hasil dari proses hidrolisis selama penggorengan. Kandungan FFA ini harus dinetralkan melalui proses esterifikasi atau transesterifikasi menggunakan alkohol (seperti metanol) dan katalis basa agar tidak menyebabkan korosi pada logam mesin.

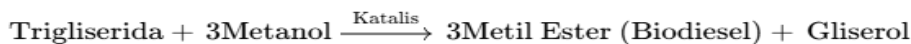
Biodiesel yang dihasilkan dari minyak kelapa bekas melalui proses transesterifikasi memiliki sifat-sifat yang mendekati solar namun dengan beberapa perbedaan karakteristik yang krusial. Karakteristik ini sangat menentukan performa pembakaran dan daya tahan mesin. Parameter utama yang dievaluasi meliputi massa jenis (density), viskositas kinematik, angka setana, titik nyala (flash point), dan nilai kalor (Hutomo Jiwo Satrio, et al. 2024). Massa jenis biodiesel yang lebih tinggi dibandingkan solar (0,88 vs 0,83 g/ml) berarti bahwa sistem injeksi akan menyemprotkan massa bahan bakar yang lebih besar untuk volume yang sama.⁵ Meskipun nilai kalor biodiesel kelapa sedikit lebih rendah (sekitar 2-5% di bawah solar), angka setana yang tinggi dan keberadaan oksigen dalam molekul biodiesel (sekitar 11% berat) sering kali mengkompensasi kekurangan energi tersebut, sehingga daya mesin yang dihasilkan tetap kompetitif (Hutomo Jiwo Satrio, et al. 2024). Kehadiran oksigen dalam biodiesel (oxygenated fuel) memungkinkan terjadinya oksidasi yang lebih sempurna selama proses ekspansi di ruang bakar, yang secara langsung berdampak pada penurunan emisi gas berbahaya.

Meskipun menawarkan manfaat lingkungan yang besar, penggunaan biodiesel minyak kelapa bekas bukannya tanpa risiko teknis. Masalah utama yang sering dihadapi adalah sifat higroskopis biodiesel (kemampuannya menyerap air dari udara) dan potensi pembentukan endapan atau deposit (Mardono. 2008). Keberadaan air dalam tangki bahan bakar dapat memicu pertumbuhan mikroba dan hidrolisis biodiesel, yang menghasilkan asam lemak bebas yang bersifat korosif terhadap komponen logam seperti tangki, saluran bahan bakar, dan pompa injeksi (Zakia Salsabillah, et al. 2024).

Asam lemak bebas (FFA) dalam bahan bakar harus dibatasi, biasanya maksimal 0,6 mgKOH/gr sesuai ketentuan Ditjen Migas, untuk mencegah kerusakan pada material mesin (Zakia Salsabillah, et al. 2024). Selain itu, kandungan belerang dalam bahan bakar diesel meskipun rendah pada biodiesel tetap harus dipantau karena pembakaran belerang menghasilkan gas korosif yang dapat mengembun pada dinding silinder, terutama saat mesin beroperasi pada beban ringan dan suhu rendah (Seno Darmono, et al. 2006).

TINJAUAN PUSTAKA

Sintesis biodiesel dilakukan melalui reaksi transesterifikasi, yaitu proses mereaksikan trigliserida (minyak nabati atau lemak hewani) dengan alkohol rantai pendek (biasanya metanol) dengan bantuan katalis. Reaksi ini bertujuan untuk memutus rantai gliserol dari molekul trigliserida dan menggantinya dengan gugus alkil dari alkohol, menghasilkan metil ester (biodiesel) dan gliserol sebagai produk sampingan. Persamaan reaksi umum transesterifikasi dapat digambarkan sebagai berikut:



Norma dalam sintesis ini melibatkan optimasi variabel proses untuk mencapai konversi maksimum. Beberapa faktor kritis yang mempengaruhi hasil meliputi:

1. Rasio Molar Alkohol terhadap Minyak: Secara stoikiometri diperlukan 3 mol metanol untuk 1 mol trigliserida, namun dalam praktik penelitian, rasio 6:1 atau lebih sering digunakan untuk mendorong kesetimbangan ke arah produk.
2. Jenis dan Konsentrasi Katalis: Katalis basa homogen seperti NaOH atau KOH (sekitar 1% berat) adalah yang paling umum digunakan karena kecepatan reaksinya tinggi pada suhu rendah (sekitar 60°C) (R. Sudradjat, et al. 2010). Katalis heterogen seperti CaO dari cangkang telur juga mulai dikembangkan untuk kemudahan pemisahan produk (Syarifuddin Oko, et al. 2021) Syarifuddin Oko, et al. 2021)
3. Suhu dan Waktu Reaksi: Reaksi umumnya dilangsungkan pada suhu 60-65°C selama 30 hingga 120 menit (R. Sudradjat, et al. 2010) Penggunaan teknologi gelombang mikro (*microwave*) atau ultrasonik dapat mempercepat waktu reaksi secara signifikan melalui pemanasan volumetrik dan kavitas akustik.(Tiara Priscilla, et al. 2024)

Minyak goreng bekas atau minyak jelantah merupakan bahan baku potensial yang murah dan mengurangi limbah lingkungan. Namun, minyak jelantah memiliki batasan ilmiah berupa kandungan Asam Lemak Bebas (FFA) yang tinggi akibat proses penggorengan berulang. Norma teknis menetapkan bahwa jika kadar FFA melebihi 2%, maka reaksi transesterifikasi langsung akan menyebabkan pembentukan sabun (*saponifikasi*) yang menghambat pemisahan biodiesel. Solusi pemecahan masalah ini adalah melalui proses sintesis dua tahap:

1. Esterifikasi: Reaksi menggunakan katalis asam (seperti H₂SO₄) untuk mengubah FFA menjadi ester.
2. Transesterifikasi: Reaksi lanjutan menggunakan katalis basa untuk mengubah trigliserida yang tersisa menjadi biodiesel.

Dalam pengujian performa, beberapa parameter utama dianalisis untuk memecahkan masalah efisiensi energi. Daya dan Torsi: Daya efektif (*N_e*) dan torsi (*T*) diukur menggunakan dinamometer. Analisis menunjukkan bahwa penggunaan biodiesel murni (B100) atau campuran tinggi (B40, B100) seringkali menghasilkan daya yang sedikit lebih rendah (sekitar 2-5%) dibanding solar murni (Sakinah Himav Rezeika, et al. 2018). Hal ini disebabkan oleh nilai kalor biodiesel (sekitar 37-40 MJ/kg) yang lebih rendah daripada solar (sekitar 42-44 MJ/kg).

1. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (*Specific Fuel Consumption / SFC*): SFC mengukur massa bahan bakar yang dikonsumsi per satuan daya yang dihasilkan per jam. Secara umum, SFC biodiesel lebih tinggi daripada solar karena mesin memerlukan lebih banyak massa bahan bakar untuk mengkompensasi nilai energi yang lebih rendah (Ojo Kurdi. 2006).
2. Efisiensi Termal (η_{th}): Analisis efisiensi termal memberikan gambaran tentang seberapa efektif mesin mengubah energi kimia bahan bakar menjadi kerja. Meskipun nilai kalornya lebih rendah, beberapa penelitian mencatat efisiensi termal biodiesel seringkali lebih baik atau setara dengan solar karena kandungan oksigen intrinsik dalam biodiesel yang mendukung pembakaran lebih sempurna (Wahyudi, et al. 2023).

Rumus dasar yang digunakan dalam analisis ini meliputi:

$$\eta_{th} = \frac{3600 \times P}{m_f \times LCV} \times 100\%$$

Dimana *P* adalah daya (kW), *m_f* adalah laju aliran massa bahan bakar (kg/h), dan *LCV* adalah *Lower Calorific Value* (kJ/kg) (Hendra Purnomo, et al. 2024). Salah satu keunggulan utama biodiesel adalah perbaikan emisi gas buang yang dianalisis menggunakan *Gas Analyzer* dan *Smoke Opacity Meter*. Norma lingkungan menuntut penurunan emisi berbahaya:

1. Karbon Monoksida (CO) dan Hidrokarbon (HC): Penggunaan biodiesel secara konsisten menurunkan emisi CO dan HC karena pembakaran yang lebih tuntas akibat sifat *oxygenated fuel* pada biodiesel.
2. Nitrogen Oksida (NO_x): Terdapat batasan pada aspek ini, di mana emisi NO_x cenderung meningkat sedikit pada penggunaan biodiesel. Hal ini disintesis sebagai dampak dari peningkatan suhu pembakaran dan pergeseran *injection timing* yang lebih awal akibat viskositas dan densitas yang lebih tinggi.
3. Opasitas (Kepekatan Asap): Opasitas menurun secara signifikan pada penggunaan biodiesel, yang mengindikasikan berkurangnya emisi partikel jelaga atau karbon yang tidak terbakar.

METODOLOGI

Penelitian ini dirancang menggunakan metode eksperimen laboratorium yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi komposisi campuran bahan bakar terhadap performa mesin. Fokus utama pengujian ini adalah melihat sejauh mana perubahan rasio antara solar dan biodiesel berdampak pada daya mesin serta kualitas emisi gas buang yang dihasilkan. Seluruh rangkaian kegiatan eksperimental ini dilaksanakan selama dua bulan, terhitung sejak bulan Juni hingga Juli, bertempat di Bengkel Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ambon.

Dalam pelaksanaannya, penelitian mengacu pada tiga kategori variabel utama. Variabel bebas yang dimanipulasi adalah perbandingan campuran solar dan biodiesel, sementara jumlah konsumsi bahan bakar (dalam satuan cc) ditetapkan sebagai variabel terikat. Untuk menjaga validitas hasil, variabel terkontrol ditetapkan pada putaran mesin yang dijaga konstan pada ± 2000 rpm, suhu ruangan yang dianggap stabil, serta kondisi mesin yang statis. Instrumen yang digunakan meliputi mesin diesel sebagai objek uji utama, *tachometer* untuk memantau putaran mesin, alat uji emisi gas buang, *stopwatch*, gelas ukur, serta peralatan mekanik standar.

Tahap awal penelitian dimulai dengan produksi biodiesel secara mandiri melalui proses transesterifikasi. Proses ini melibatkan pencampuran 1 liter minyak goreng dengan 200 ml metanol dan bantuan katalis Natrium Hidroksida (NaOH) atau soda api. Takaran katalis dibedakan berdasarkan kualitas bahan baku : 3,5 gram untuk minyak goreng baru atau 4,5 gram untuk minyak goreng bekas (jelantah). Larutan tersebut diaduk secara cepat selama 15 hingga 20 menit pada suhu konstan 55° C, kemudian didiamkan selama satu malam hingga terbentuk lapisan biodiesel yang terpisah sempurna di bagian atas.

Pengujian dilakukan pada mesin diesel dengan spesifikasi teknis sebagai berikut : tipe 4-langkah, 2-silinder, dengan isi silinder sebesar 120 cc. Mesin ini memiliki perbandingan kompresi yang cukup tinggi, yaitu 22:1, dan mampu menghasilkan daya maksimum sebesar 47 BHP pada putaran 3200 rpm. Sistem pendinginan mesin menggunakan media udara dan dilengkapi dengan sistem starter ganda berupa pedal dan elektrik.

Prosedur pengambilan data dilakukan secara sistematis dengan menyiapkan enam variasi campuran bahan bakar solar dan biodiesel, mulai dari komposisi 100:0 (solar murni), 98:2, 96:4, 94:6, 92:8, hingga 90:10 persen. Mesin diposisikan statis menggunakan standar utama dan dihidupkan hingga mencapai putaran stabil di angka ± 2000 rpm. Selang bahan bakar kemudian dihubungkan ke gelas ukur, dan durasi pemakaian bahan bakar dicatat menggunakan *stopwatch*. Untuk menjamin akurasi dan konsistensi data, setiap variasi campuran diuji sebanyak lima kali pengulangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data eksperimental kuantitatif yang diekstraksi dari hasil pengujian memberikan perekaman mikroskopis dan sekuensial terhadap perilaku transien mesin pembakaran dalam (SI Engine). Pengujian ini secara metodologis membagi observasi ke dalam dua rezim operasional mekanis: putaran rendah yang mensimulasikan kondisi *idle* atau beban sangat ringan (dengan target kalibrasi 1500 RPM) dan putaran menengah yang merepresentasikan transisi menuju beban kerja (dengan target kalibrasi 2000 RPM). Pengukuran fluktuasi poros engkol dilakukan secara interval pada menit ke-1, 3, 5, dan 7 untuk setiap variasi campuran bahan bakar. Jendela waktu observasi ini sangat penting secara akademis karena menangkap profil dinamika mesin mulai dari fase transien termal awal (prapemanasan) hingga mencapai keseimbangan suhu operasional tunak (*steady-state thermal equilibrium*).

Degradasi Kinerja Putaran 1500 RPM

Pada bagian putaran rendah, seperti yang terjadi pada kondisi *idle* di lalu lintas perkotaan, dinamika fluida di dalam ruang bakar menghadirkan tantangan tersendiri. Aliran campuran udara dan bahan bakar yang melintasi katup masuk memiliki kecepatan dan tingkat turbulensi yang relatif rendah. Kondisi hidrodinamis yang lambat ini sering kali menyulitkan proses homogenisasi campuran, yang berujung pada efisiensi pembakaran yang suboptimal dan rentan terhadap deviasi siklus-ke-siklus (*cycle-to-cycle variations*). Tabel 1 merangkum secara komprehensif rata-rata keluaran putaran mesin (RPM) eksperimental untuk berbagai konsentrasi campuran bioetanol-bensin pada target kalibrasi awal 1500 RPM.

Tabel 1. Putaran 1500 Rpm

Campuran Bahan Bakar	Rata-rata 1 Menit	Rata-rata 3 Menit	Rata-rata 5 Menit	Rata-rata 7 Menit	Kisaran Fluktuasi Absolut (Max - Min)
Bensin 100% (E0)	1530 RPM	1530 RPM	1590 RPM	1540 RPM	60 RPM
Bensin 98% / Etanol 2% (E2)	1530 RPM	1510 RPM	1530 RPM	1510 RPM	20 RPM
Bensin 96% /	1510 RPM	1510 RPM	1560 RPM	1570 RPM	60 RPM

Etanol 4% (E4)					
Bensin 94% / Etanol 6% (E6)	1540 RPM	1520 RPM	1560 RPM	1600 RPM	80 RPM
Bensin 92% / Etanol 8% (E8)	1600 RPM	1550 RPM	1550 RPM	1590 RPM	50 RPM
Bensin 90% / Etanol 10% (E10)	1560 RPM	1550 RPM	1550 RPM	1550 RPM	10 RPM

Berdasarkan agregasi dan dekonstruksi data pada Tabel 1, terlihat sebuah tren mekanis yang sangat anomali sekaligus positif seiring dengan peningkatan konsentrasi etanol pada rezim putaran rendah. Penggunaan bensin murni konvensional (E0) mendemonstrasikan perilaku fluktuasi yang cukup persisten dan liar. Dari basis putaran 1530 RPM pada menit-menit awal, putaran melonjak secara mendadak ke 1590 RPM pada menit ke-5 sebelum kembali turun ke 1540 RPM. Kisaran deviasi sebesar 60 RPM ini merupakan manifestasi dari ketidakstabilan termal dan pembakaran parsial yang lazim terjadi pada siklus *idle* mesin berteknologi lama atau karburator, di mana sistem gagal mempertahankan rasio stoikiometri secara presisi seiring dengan pemuatan termal komponen logam mesin.

Sebaliknya, saat persentase bioetanol ditingkatkan mencapai ambang batas 10% (E10), mesin menunjukkan tingkat stabilitas operasional yang luar biasa superior. Setelah mengalami fase penyesuaian awal pada menit pertama (1560 RPM), putaran mesin terkunci secara virtual pada angka 1550 RPM secara persisten dan tanpa jeda selama observasi menit ke-3, ke-5, dan ke-7. Deviasi maksimal yang tercatat hanya menyentuh rentang 10 RPM, sebuah tingkat kehalusan operasional yang jarang terlihat pada pengujian mesin skala kecil tanpa intervensi kontrol elektronik tingkat lanjut.

Secara akademis, stabilitas ekstrem yang diamati pada tingkat campuran E10 di putaran rendah ini dapat secara langsung diatribusikan pada sifat *oxygenated* dari molekul etanol.⁹ Pada kondisi *idle*, di mana efisiensi volumetrik berada pada titik nadir, sistem pemasukan bahan bakar sering kali secara tidak sengaja menginjeksikan porsi fluida yang lebih kaya (*rich mixture*) untuk mencegah mesin mati mendadak (*stalling*). Namun, kondisi kaya ini menyisakan kantong-kantong hidrokarbon yang tidak terbakar secara merata.¹¹ Di sinilah peran krusial oksigen intramolekuler dalam E10 bekerja. Oksigen yang terikat dalam struktur kimia etanol bertindak sebagai katalis pembakaran pasif yang berdifusi secara merata di seluruh ruang bakar, mempromosikan reaksi oksidasi hidrokarbon sekunder yang jauh lebih seragam dan stabil meskipun tingkat turbulensi gas berada pada kondisi minimal (Thanh Dihn Xuan, et al. 2022).

Sebagai hasil dari mekanisme oksidasi yang ditingkatkan ini, laju pelepasan panas per siklus pembakaran (Heat Release Rate - HRR) menjadi jauh lebih simetris dan dapat diprediksi dari satu derajat engkol ke derajat engkol berikutnya. Keseragaman tekanan indikatif rata-rata (*Indicated Mean Effective Pressure* - IMEP) secara mekanis meminimalkan osilasi kinetik pada poros engkol, yang pada alat ukur putaran termanifestasi sebagai hilangnya fluktuasi RPM (*hunting*). Literatur terkini dan komprehensif mengonfirmasi fenomena empiris ini, menegaskan bahwa penambahan volume etanol pada rentang 10% hingga 20% secara fundamental dan terukur mereduksi deviasi siklus-ke-siklus (*cycle-to-cycle variation*) pembakaran pada pengoperasian putaran mesin rendah (Shailesh Sonawane, et al. 2025).

Degradasi Kinerja Putaran 2000 RPM

Transisi analitis menuju target putaran 2000 RPM memunculkan dinamika termodinamika yang sangat berbeda secara diametral. Pada bagian putaran menengah ini, beban mekanis internal dan gaya gesek (*frictional losses*) meningkat secara kuadratik, frekuensi durasi langkah hisap silinder memendek secara signifikan (memberikan waktu yang lebih sempit untuk atomisasi), dan tuntutan terhadap laju aliran massa energi (*mass energy*

flow rate) melonjak drastis. Tabel 2 merepresentasikan secara sistematis anomali perilaku RPM pada rezim operasional ini berdasarkan data.

Tabel 2. Putaran 2000 Rpm

Campuran Bahan Bakar	Rata-rata 1 Menit	Rata-rata 3 Menit	Rata-rata 5 Menit	Rata-rata 7 Menit	Karakteristik Tren Keseluruhan
Bensin 100% (E0)	2100 RPM	2080 RPM	2010 RPM	1990 RPM	Deklinasi Tajam (Konvergensi Termal)
Bensin 98% / Etanol 2% (E2)	2040 RPM	2040 RPM	2000 RPM	2020 RPM	Deviasi Moderat, Stabil Tinggi
Bensin 96% / Etanol 4% (E4)	1980 RPM	2010 RPM	1990 RPM	1990 RPM	Terkunci Presisi Dekat Target
Bensin 94% / Etanol 6% (E6)	1990 RPM	2000 RPM	2040 RPM	2050 RPM	Inklinasi Progresif Termal
Bensin 92% / Etanol 8% (E8)	1950 RPM	2010 RPM	1960 RPM	1950 RPM	Osilasi dan Fluktuasi Lebar
Bensin 90% / Etanol 10% (E10)	1980 RPM	1940 RPM	2010 RPM	1950 RPM	Sub-Target Persisten (Defisit Daya)

Dinamika yang terekam pada target 2000 RPM memperlihatkan pembalikan karakteristik stabilitas yang sangat menarik dibandingkan dengan observasi pada 1500 RPM. Bensin murni konvensional (E0) awalnya mengalami putaran berlebih yang cukup ekstrem pada fase pemanasan awal (2100 RPM pada menit ke-1), yang kemungkinan besar disebabkan oleh intervensi sistem cuk (*choke*) mekanis atau pengkayaan campuran elektronik awal saat mesin masih dalam suhu dingin. Seiring dengan peningkatan suhu blok silinder dan manifold menuju ekuilibrium termal (memasuki menit ke-5 dan ke-7), efisiensi mekanis membaik, dan sistem secara natural mengoreksi putarannya untuk turun dan stabil di kisaran 1990-2010 RPM.⁷

Akan tetapi, hal yang sangat bertolak belakang terjadi ketika konsentrasi bioetanol ditingkatkan menuju rasio E8 dan E10. Alih-alih mempertahankan putaran tinggi yang konstan sebagaimana diamati pada E0, campuran E10 secara konsisten berjuang dan sering kali gagal mempertahankan target rotasi, berada secara persisten jauh di bawah ambang target. Mesin berosilasi dan terperosok hingga menyentuh titik terendah 1940 RPM pada menit ke-3, sebelum mencoba pulih ke 2010 RPM pada menit ke-5, lalu jatuh kembali ke 1950 RPM pada akhir periode pengamatan. Penurunan absolut pada parameter RPM di saat konsentrasi etanol ditingkatkan dengan asumsi bukaan katup *throttle* dipertahankan pada posisi konstan selama eksperimen merupakan manifestasi kinetik langsung dari defisit Nilai Kalor Bawah (LHV) bioetanol yang dibahas sebelumnya (Gabrielius Mejeris, et al. 2026). Ketika ruang bakar dikunci pada volume udara spesifik, jumlah total energi kimia yang masuk ke dalam silinder untuk setiap siklus hisap pada penggunaan E10 secara komparatif berkisar antara 3% hingga 4% lebih rendah secara absolut dibandingkan dengan penggunaan bensin E0 (Lukasz Wargula, et al. 2025). Mengingat bahwa beban inersia dan profil gesekan internal mesin pada putaran 2000 RPM tidak berubah, pengurangan asupan energi ini menyebabkan ketidakseimbangan torsi. Mesin tidak lagi menghasilkan tenaga mekanis yang cukup untuk melawan

bebannya sendiri pada 2000 RPM, sehingga putaran akan melambat hingga menemukan keseimbangan dinamika baru pada putaran yang lebih rendah (dalam kasus E10 ini, berlabuh di sekitar 1950 RPM rata-rata).

Fenomena deklinasi ini memberikan wawasan penting tentang batasan sistem pasokan bahan bakar. Jika mesin uji menggunakan arsitektur karburator konvensional atau injeksi generasi awal (tanpa sensor Oksigen loop-tertutup), sistem tidak memiliki kecerdasan buatan untuk mengkompensasi defisit energi ini dengan meningkatkan debit bahan bakar (Gabrielius Mejeras, et al. 2026). Studi simulasi dan analisis pengereman dinamometer (chassis dynamometer tests) oleh berbagai pakar tribologi otomotif secara mutlak memvalidasi bahwa keluaran daya rem (*brake power*), torsi absolut, dan stabilitas putaran pada rentang beban menengah ke atas akan terdegradasi secara proporsional jika mesin tidak beradaptasi terhadap densitas energi bioetanol.

Selanjutnya, fluktuasi bergelombang yang liar dan tidak teratur pada campuran E8 (beralih drastis dari 1950 menuju 2010 lalu jatuh kembali ke 1960 RPM) mengindikasikan transisi fase pembakaran yang tidak stabil. Karena etanol memiliki panas laten penguapan yang menyerap jumlah kalor secara sangat masif, suhu dalam saluran *intake* mengalami degradasi tajam. Pada putaran yang lebih tinggi seperti 2000 RPM, waktu residensi (waktu kontak) butiran bahan bakar dengan dinding manifold yang hangat menjadi sangat sempit. Akibatnya, pendinginan intensif ini membatasi proses vaporisasi yang seragam, menyebabkan campuran masuk ke dalam silinder sebagian dalam fase cair. Variasi wujud fisik ini dari satu siklus ke siklus berikutnya mengacaukan rambatan api, menciptakan osilasi torsi yang pada layar alat ukur dimanifestasikan sebagai instabilitas RPM (*engine hunting*) (Thanh Dihn Xuan, et al. 2022).

PENUTUP

Kesimpulan

Analisis terhadap perilaku transien mesin pembakaran dalam (SI Engine) pada berbagai campuran bioetanol-bensin menghasilkan beberapa poin utama:

1. Stabilitas Optimal pada Putaran Rendah (1500 RPM): Penggunaan campuran bioetanol hingga 10% (E10) secara signifikan meningkatkan stabilitas operasional mesin pada kondisi *idle*. Hal ini dibuktikan dengan rendahnya fluktuasi (hanya 10 RPM) dibandingkan bensin murni (E0) yang mencapai 60 RPM. Sifat *oxygenated* pada etanol membantu oksidasi hidrokarbon yang lebih seragam meskipun turbulensi udara rendah.
2. Defisit Performa pada Putaran Menengah (2000 RPM): Sebaliknya, pada putaran 2000 RPM, campuran E10 menunjukkan penurunan kinerja dan kegagalan dalam menjaga target rotasi. Mesin mengalami defisit daya dan hanya mampu berlabuh di rata-rata 1950 RPM.
3. Pengaruh Nilai Kalor (LHV): Penurunan RPM pada campuran etanol tinggi di putaran menengah merupakan dampak langsung dari rendahnya Nilai Kalor Bawah (LHV) bioetanol. Energi kimia yang masuk ke silinder pada E10 tercatat 3% hingga 4% lebih rendah dibandingkan E0, sehingga torsi yang dihasilkan tidak cukup untuk melawan beban inersia mesin pada 2000 RPM.
4. Anomali Termodinamika: Campuran etanol tinggi (seperti E8) menyebabkan fluktuasi liar pada putaran menengah akibat panas laten penguapan etanol yang tinggi. Hal ini mendinginkan saluran *intake* secara drastis, menghambat penguapan sempurna, dan menyebabkan bahan bakar masuk ke silinder dalam fase cair, yang akhirnya mengacaukan rambatan api.

Saran

Untuk mengoptimalkan penggunaan campuran bioetanol pada mesin pembakaran dalam, disarankan beberapa langkah berikut:

1. Modifikasi Sistem Suplai Bahan Bakar: Mengingat mesin dengan arsitektur karburator atau injeksi lama tidak mampu mengompensasi defisit energi secara otomatis, diperlukan penyesuaian debit bahan bakar (kalibrasi ulang *jetting* atau durasi injeksi) saat menggunakan campuran etanol tinggi agar target RPM tetap tercapai.
2. Penerapan Sensor Oksigen *Closed-Loop*: Sangat disarankan untuk menggunakan sistem kontrol elektronik tingkat lanjut dengan sensor oksigen loop-tertutup guna mendeteksi defisit energi secara *real-time* dan melakukan koreksi campuran secara presisi.
3. Manajemen Termal Saluran Masuk: Perlu dilakukan kajian lebih lanjut mengenai pemanasan awal pada saluran *intake* untuk memitigasi efek pendinginan intensif akibat panas laten penguapan etanol, terutama

- pada putaran menengah ke atas, guna memastikan penguapan bahan bakar yang lebih seragam.
4. Pembatasan Campuran pada Mesin Standar: Untuk mesin skala kecil tanpa intervensi kontrol elektronik, penggunaan bioetanol disarankan tetap berada pada rentang rendah (maksimal 10%) guna mendapatkan manfaat stabilitas *idle* tanpa mengorbankan performa pada beban kerja yang lebih tinggi secara drastis.

Referensi

- Aminatus Sa'diyah, et all. 2024. Pengaruh Rasio Bahan Bakar Multi feedstock Biodiesel Terhadap Nilai Emisi Gas Buang Pada Mesin Diesel 4. Jurnal Teknologi Maritim Vol. 8 No.1
- Gabrielius Mejezas, et all. 2026. Study of Gasoline with 10% Ethanol Additive Under Different Fuel Supply Strategies - MDPI, Journal Energies. Vol. 19 Issue. 5
- Hendra Purnomo, et all. 2024. Uji Ekperimental Performa Mesin Diesel Menggunakan Bahan Bakar Biodiesel B35 - Jurnal Politeknik Pelayaran Sulawesi Utara. Kalao's Maritime Journal. Vol. 5 No. 1; 28-36
- Hutomo Jiwo Satrio, et all. 2024. Karakteristik Palm Oil Biodiesel dan Performa Mesin Diesel : A Review, Jurnal Creative Research in Engineering. Vol. 4 No.2 ; 54-70
- Lukasz Wargula, et all. 2025 Critical Concerns Regarding the Transition from E5 to E10 Gasoline in the European Union, Particularly in Poland in 2024 A Theoretical and Experimental Analysis of the Problem of Controlling the Air–Fuel Mixture Composition (AFR) and the λ Coefficient - MDPI, Journals Energies. Vol. 18 Issue 4
- Maciej Gajewski, et all. 2025. Effects of Ethanol–Gasoline Blends on the Performance and Emissions of a Vehicle Spark-Ignition Engine - MDPI, Journals Energies. Vol. 18 Issue 13
- Mardono. 2008. Studi Emisi Pencemar Biodiesel dari Minyak Goreng Bekas pada Mesin Diesel Generator 5 KVA. Lembaran Publikasi Lemigas. Vol. 42 No. 1 ; 1-10
- Ojo Kurdi. 2006. uji performa biodisel dari minyak jarak pagar yang diproduksi secara enzimatis pada mesin disel - undip e-journal system. Rotasi Vol. 8 No. 3
- R. Sudradjat, et all. 2010. Proses Transesterifikasi Pada Pembuatan ... - Neliti, Jurnal Penelitian Hasil Hutan. Vol 28 No.2 ; 184 - 198
- Sakinah Himav Rezeika, et all. 2018. Sintesis Biodiesel dari Minyak Jelantah dengan Katalis NaOH dengan Variasi Waktu Reaksi Transesterifikasi dan Uji Performanya dengan Mesin Diesel | rezeika | Akta Kimia Indonesia – ITS. Vol 3 No.2
- Seno Darmono, et all. 2006. Analisa Biodiesel Minyak Kelapa Sebagai Bahan Bakar Alternatif Minyak Diesel - Jurnal Unimus. Vol. 4 No. 2
- Shailesh Sonawane, et all. 2025. Performance and In-cylinder Combustion Analysis of Gasoline Ethanol Fueled Spark-Ignition Engine | IIETA, Journals MMEP. 936 - 948
- Sudaryadi, et all. 2022. Laporan Penelitian Identifikasi Potensi Ketersediaan dan Model Pengumpulan Minyak Jelantah dari Rumah Tangga dan Usaha Mikro unt. Traction Energi Asia 2022
- Syarifuddin Oko, et all. 2021. Sintesis Biodiesel Dari Minyak Kedelai Melalui Reaksi Transesterifikasi Dengan Katalis CaO/NaOH – Neliti. Jurnal teknologi. Vol 13 No.1
- Thanh Dihn Xuan, et all. 2022. Full article: Influence of ethanol-gasoline blended fuel on performance and emission characteristics of the test motorcycle engine - Taylor & Francis, Journal of the Air & Waste Management Association. Vol 72 Issue. 8
- Tiara Priscilla, et all. 2024. Sintesis Biodiesel Dari Minyak Jelantah Dalam Reaktor Ultrasonik - UNDIP E-Journal System. Jurnal Energi Baru dan Terbarukan. Vol 5 No. 1 : 44-56
- Wahyudi, et all. 2023. Unjuk Kerja Mesin Diesel Berbahan Bakar Campuran Biodiesel Jatropa- Jelantah 1:9 - Jurnal Elektronik Universitas Muhammadiyah Metro. Vol. 12 No.02
- Zakia Salsabillah, et all. 2024. Strategi Perbaikan Kualitas Biosolar Berdasarkan Kandungan Air Dan TAN Yang Meningkatkan Akibat Penyimpanan Di Ruang Terbuka. Jurnal Globe. Vol. 2 No. 2