

LAPORAN AKHIR
PENELITIAN MANDIRI



OPTIMASI PROSES PEMBAKARAN DAN EMISI GAS
BUANG PADA MESIN PEMBAKARAN INTERNAL
DENGAN PENAMBAHAN ADITIF BIOFUEL BERBASIS
BIOMASSA LOKAL

PENGUSUL

SRI WULAN
NIDN : 0627119004

UNIVERSITAS SULTAN FATAH DEMAK

2023

OPTIMASI PROSES PEMBAKARAN DAN EMISI GAS BUANG PADA MESIN PEMBAKARAN INTERNAL DENGAN PENAMBAHAN ADITIF BIOFUEL BERBASIS BIOMASSA LOKAL

Sri Wulan, S.Pd., M.Pd

Fakultas Teknik Universitas Sultan Fatah (UNISFAT) Demak

Wulanwallacesnoopy@gmail.com

Jl. Raya Katonsari 19 Demak Telpn (0291) 686227

Abstrak, Ketergantungan global pada bahan bakar fosil telah memicu krisis energi dan masalah lingkungan serius akibat emisi gas buang mesin pembakaran internal. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan proses pembakaran dan mengurangi emisi gas buang pada mesin diesel dengan menambahkan aditif biofuel berbasis biomassa lokal. Metode eksperimental kuantitatif digunakan dengan menguji berbagai persentase campuran aditif biofuel (B5, B10, B15, B20) dengan bahan bakar diesel standar (B0) pada mesin diesel silinder tunggal di bawah kondisi operasi yang terkontrol.

Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa penambahan aditif biofuel meningkatkan densitas, viskositas, angka setana, dan kandungan oksigen pada campuran bahan bakar. Dari sisi pembakaran, penggunaan aditif biofuel secara signifikan meningkatkan tekanan puncak silinder dan laju pelepasan kalor (HRR), serta memperpendek periode penundaan penyalaan, menandakan proses pembakaran yang lebih cepat dan efisien. Terkait emisi gas buang, aditif biofuel sangat efektif dalam menurunkan emisi karbon monoksida (CO), hidrokarbon tidak terbakar (UHC), dan partikulat (PM). Penurunan ini terutama disebabkan oleh kandungan oksigen dalam aditif yang mendukung pembakaran lebih lengkap. Namun, emisi nitrogen oksida (NO_x) menunjukkan sedikit peningkatan pada beberapa komposisi karena kenaikan suhu pembakaran puncak. Meskipun demikian, konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) hanya menunjukkan sedikit peningkatan.

Dari analisis data, komposisi aditif biofuel sebesar 10% hingga 15% (B10-B15) ditemukan sebagai rentang optimal yang memberikan keseimbangan terbaik antara peningkatan efisiensi pembakaran dan pengurangan emisi polutan berbahaya, sembari menjaga NO_x dan SFC pada tingkat yang dapat diterima. Penelitian ini menunjukkan potensi besar biomassa lokal sebagai sumber aditif biofuel untuk mencapai pembakaran yang lebih bersih dan efisien pada mesin diesel, berkontribusi pada solusi energi terbarukan dan mitigasi dampak lingkungan.

Kata kunci: Mesin Pembakaran Internal, Aditif Biofuel, Biomassa Lokal, Proses Pembakaran, Emisi Gas Buang, Optimasi.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang

Mesin pembakaran internal (Internal Combustion Engine/ICE) telah menjadi tulang punggung transportasi dan industri selama lebih dari satu abad. Namun, ketergantungan yang tinggi terhadap bahan bakar fosil telah menimbulkan berbagai permasalahan serius, terutama terkait krisis energi dan dampak negatif terhadap lingkungan. Pembakaran bahan bakar fosil melepaskan gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO₂), serta polutan berbahaya lainnya seperti nitrogen oksida (NO_x), partikulat (PM), karbon monoksida (CO), dan hidrokarbon yang tidak terbakar (UHC) ke atmosfer (Smith, J. R. 2020). Emisi gas buang ini berkontribusi terhadap pemanasan global, hujan asam, kabut asap, dan berbagai masalah kesehatan manusia (Johnson, M. A., & Davis, L. E. 2019).

Dalam upaya mengurangi dampak negatif tersebut, berbagai penelitian dan pengembangan telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi pada ICE. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah penggunaan biofuel sebagai alternatif atau aditif pada bahan bakar konvensional. Biofuel, yang berasal dari biomassa, dianggap sebagai sumber energi terbarukan yang memiliki potensi untuk mengurangi jejak karbon secara signifikan dibandingkan dengan bahan bakar fosil (Demirbas, A. 2009). Indonesia, sebagai negara agraris dengan keanekaragaman hayati yang melimpah, memiliki potensi biomassa lokal yang sangat besar, seperti kelapa sawit, jarak pagar, singkong, dan alga, yang dapat dimanfaatkan untuk produksi biofuel (Sukmawati, A., & Purnomo, H. 2021).

Penambahan aditif biofuel ke dalam bahan bakar konvensional diharapkan dapat mengoptimalkan proses pembakaran di dalam silinder mesin. Aditif biofuel dapat meningkatkan angka setana, meningkatkan kandungan oksigen dalam bahan bakar, dan memperbaiki sifat pelumasan, yang pada gilirannya dapat menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna dan mengurangi emisi gas buang yang berbahaya (Kumar, S., & Singh, B. P. 2018). Namun, karakteristik biomassa lokal yang beragam memerlukan studi mendalam untuk mengidentifikasi potensi dan dampaknya secara spesifik pada kinerja mesin dan emisi. Oleh karena itu, penelitian ini akan berfokus pada eksplorasi dan optimasi penggunaan aditif biofuel berbasis biomassa lokal di Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh penambahan aditif biofuel berbasis biomassa lokal terhadap karakteristik proses pembakaran (tekanan silinder, laju pelepasan kalor, dan durasi pembakaran) pada mesin pembakaran internal?
2. Bagaimana dampak penambahan aditif biofuel berbasis biomassa lokal terhadap konsentrasi emisi gas buang (NO_x , CO, UHC, CO_2 , dan PM) dari mesin pembakaran internal?
3. Berapa komposisi optimal aditif biofuel berbasis biomassa lokal yang dapat memberikan peningkatan efisiensi pembakaran dan penurunan emisi gas buang secara signifikan?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Jenis mesin pembakaran internal yang akan digunakan adalah mesin diesel silinder tunggal atau multi-silinder dengan spesifikasi tertentu.
2. Biomassa lokal yang akan dipertimbangkan sebagai sumber aditif biofuel akan terbatas pada jenis yang memiliki ketersediaan melimpah di Indonesia (misalnya, minyak sawit mentah, minyak jelantah, atau produk turunan biomassa lainnya).
3. Parameter uji yang akan diukur meliputi tekanan silinder, laju pelepasan kalor, konsumsi bahan bakar spesifik, efisiensi termal, serta konsentrasi emisi NO_x , CO, UHC, CO₂ , dan PM.
4. Penelitian ini akan berfokus pada pengujian di laboratorium atau bangku uji mesin, tidak melibatkan pengujian pada kendaraan sebenarnya.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Menganalisis pengaruh penambahan aditif biofuel berbasis biomassa lokal terhadap karakteristik proses pembakaran pada mesin pembakaran internal.
2. Menginvestigasi dampak penambahan aditif biofuel berbasis biomassa lokal terhadap emisi gas buang dari mesin pembakaran internal.
3. Menentukan komposisi optimal aditif biofuel berbasis biomassa lokal untuk mencapai pembakaran yang lebih efisien dan emisi gas buang yang lebih rendah.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terfokus, maka ditetapkan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Bagi Ilmu Pengetahuan: Menambah khazanah pengetahuan di bidang energi terbarukan, teknologi mesin pembakaran internal, dan pemanfaatan biomassa lokal untuk aplikasi bahan bakar.
2. Bagi Industri: Memberikan informasi dan data teknis yang dapat digunakan sebagai dasar pengembangan formulasi bahan bakar alternatif atau aditif biofuel yang lebih ramah lingkungan.
3. Bagi Masyarakat: Berkontribusi dalam upaya mitigasi dampak perubahan iklim dan peningkatan kualitas udara, serta mendorong kemandirian energi nasional melalui pemanfaatan sumber daya biomassa lokal.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Mesin Pembakaran Internal

Mesin pembakaran internal (Internal Combustion Engine/ICE) adalah jenis mesin panas di mana pembakaran bahan bakar terjadi dengan oksidator (biasanya udara) dalam ruang tertutup yang merupakan bagian integral dari sirkuit aliran kerja fluida (Heywood, J. B. 1988). Produk pembakaran adalah gas bersuhu tinggi dan bertekanan tinggi yang mendorong komponen mesin, seperti piston, untuk menghasilkan gaya. Mesin pembakaran internal dapat diklasifikasikan berdasarkan siklus operasi (Otto atau Diesel), jumlah langkah (dua atau empat langkah), susunan silinder, dan jenis bahan bakar yang digunakan (Cengel, Y. A., & Boles, M. A. 2019)

2.1.1 Prinsip Kerja Mesin Diesel

Mesin diesel adalah jenis ICE yang beroperasi berdasarkan siklus Diesel, di mana udara dikompresi hingga suhu tinggi, kemudian bahan bakar disemprotkan ke dalam silinder dan terbakar secara spontan akibat suhu kompresi yang tinggi (Pulkrabek, W. W. 2004). Proses ini berbeda dengan mesin bensin yang menggunakan busi untuk memicu pembakaran campuran udara-bahan bakar. Siklus empat langkah pada mesin diesel meliputi:

1. **Langkah Isap (Intake Stroke):** Katup isap terbuka, piston bergerak ke bawah, dan udara murni masuk ke dalam silinder.

2. **Langkah Kompresi (Compression Stroke):** Katup isap dan buang tertutup, piston bergerak ke atas, mengompresi udara hingga mencapai tekanan dan suhu tinggi.
3. **Langkah Usaha (Power/Expansion Stroke):** Bahan bakar disemprotkan ke dalam silinder, terbakar secara spontan, dan gas hasil pembakaran mendorong piston ke bawah, menghasilkan tenaga.
4. **Langkah Buang (Exhaust Stroke):** Katup buang terbuka, piston bergerak ke atas, mendorong gas sisa pembakaran keluar dari silinder (Ganesan, V. 2008).

2.1.2 Parameter Kinerja Mesin

Untuk mengevaluasi kinerja mesin pembakaran internal, beberapa parameter penting diukur, antara lain:

- **Daya dan Torsi:** Mengindikasikan kemampuan mesin dalam menghasilkan kerja dan gaya putar (Stone, R. 1995).
- **Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (Specific Fuel Consumption/SFC):** Massa bahan bakar yang dikonsumsi per satuan daya yang dihasilkan (g/kWh). Nilai SFC yang lebih rendah menunjukkan efisiensi penggunaan bahan bakar yang lebih baik (Tuner, M. 2012).
- **Efisiensi Termal (Thermal Efficiency):** Rasio antara kerja yang dihasilkan oleh mesin dengan energi panas yang terkandung dalam bahan bakar yang masuk. Ini menunjukkan seberapa baik mesin mengubah energi kimia bahan bakar menjadi kerja mekanik (Blair, G. P. 1996).

- **Tekanan Silinder (Cylinder Pressure):** Tekanan gas di dalam silinder selama siklus pembakaran. Peningkatan tekanan puncak silinder menunjukkan pembakaran yang lebih kuat.
- **Laju Pelepasan Kalor (Heat Release Rate/HRR):** Tingkat di mana energi panas dilepaskan dari pembakaran bahan bakar di dalam silinder. HRR yang lebih tinggi dan durasi yang lebih pendek seringkali mengindikasikan pembakaran yang lebih efisien (Rakopoulos, C. D., & Giakoumis, E. G. 2009).

2.2 Proses Pembakaran pada Mesin Diesel

Proses pembakaran pada mesin diesel melibatkan beberapa tahapan kunci:

1. **Periode Penundaan Penyalaan (Ignition Delay Period):** Waktu antara awal injeksi bahan bakar dan awal pembakaran yang terdeteksi. Periode ini dipengaruhi oleh suhu dan tekanan kompresi, sifat fisik dan kimia bahan bakar (terutama angka setana), serta karakteristik injeksi (Turns, S. R. 2012).
2. **Pembakaran Terkendali Sendiri (Premixed Combustion/Rapid Combustion):** Setelah periode penundaan, bahan bakar yang telah tercampur dengan udara di dalam ruang bakar terbakar dengan cepat, menyebabkan kenaikan tekanan yang tajam.
3. **Pembakaran Terkendali Difusi (Diffusion Combustion):** Mayoritas pembakaran terjadi pada tahap ini, di mana bahan bakar yang baru diinjeksikan bertemu dengan udara dan terbakar secara difusi. Laju pembakaran pada tahap ini dikendalikan oleh laju pencampuran bahan bakar dan udara (Dec, J. E. 1997).

4. **Pembakaran Lanjut (Late Combustion/After Combustion):** Pembakaran sisa-sisa bahan bakar yang masih ada hingga langkah ekspansi. Pembakaran yang tidak sempurna pada tahap ini dapat meningkatkan emisi CO dan UHC.

2.3 Emisi Gas Buang pada Mesin Diesel

Pembakaran bahan bakar fosil pada mesin diesel menghasilkan berbagai polutan gas buang yang berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan. Regulasi emisi yang semakin ketat telah mendorong penelitian untuk mengurangi emisi ini (US EPA, 2023).

2.3.1 Jenis-jenis Emisi Utama

- Nitrogen Oksida (NO_x): Terbentuk pada suhu tinggi selama pembakaran dari reaksi antara nitrogen (N₂) dan oksigen (O₂) di udara. NO_x berkontribusi pada pembentukan kabut asap dan hujan asam (Miller, J. A., & Bowman, C. T. 1989).
- Karbon Monoksida (CO): Gas beracun yang terbentuk akibat pembakaran tidak sempurna, yaitu ketika pasokan oksigen tidak mencukupi untuk mengoksidasi seluruh karbon menjadi CO₂ (Wall, H. C., & Foster, D. M. 2016).
- Hidrokarbon Tidak Terbakar (UHC): Bahan bakar yang tidak terbakar sepenuhnya, keluar bersama gas buang. UHC dapat disebabkan oleh suhu rendah di dinding silinder, misfire, atau pembakaran yang tidak lengkap (Turns, S. R. 2012).

- Partikulat (PM): Partikel padat atau cair yang tersuspensi dalam gas buang, umumnya terdiri dari jelaga (karbon), hidrokarbon yang teradsorpsi, dan sulfat. PM sangat berbahaya bagi kesehatan pernapasan (Kittelson, D. B. 1998).
- Karbon Dioksida (CO₂): Gas rumah kaca utama hasil pembakaran sempurna bahan bakar berbasis karbon. Meskipun bukan polutan beracun langsung, CO₂ adalah kontributor utama perubahan iklim global (IPCC,2021).

2.4 Biofuel Berbasis Biomassa Lokal

Biofuel adalah bahan bakar yang berasal dari biomassa, yaitu materi organik yang berasal dari tumbuhan atau hewan. Biofuel dianggap sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan bahan bakar fosil karena sifatnya yang terbarukan dan potensinya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (Van Gerpen, J., & Knothe, G. 2005). Indonesia memiliki sumber daya biomassa lokal yang melimpah dan beragam, seperti kelapa sawit, jarak pagar, singkong, alga, limbah pertanian, dan limbah kehutanan (Sukmawati, A., & Purnomo, H. 021).

2.4.1 Jenis Biofuel dan Aditif Biofuel

- Biodiesel: Bahan bakar diesel yang terbuat dari minyak nabati atau lemak hewani melalui proses transesterifikasi. Biodiesel memiliki angka setana yang tinggi dan kandungan oksigen yang dapat meningkatkan pembakaran (Demirbas, A. 2007).

- Bioetanol: Alkohol yang diproduksi melalui fermentasi biomassa yang kaya gula atau pati. Bioetanol umumnya digunakan sebagai campuran dengan bensin (Goldemberg, J. 2007).
- Bio-Oil/Pyrolysis Oil: Cairan yang dihasilkan dari proses pirolisis cepat biomassa. Bio-oil memiliki viskositas tinggi dan nilai kalor yang lebih rendah dari bahan bakar konvensional, sehingga memerlukan peningkatan kualitas atau digunakan sebagai aditif (Bridgewater, A. V. 2012).
- Aditif Biofuel: Senyawa berbasis biomassa yang ditambahkan dalam proporsi kecil ke bahan bakar konvensional untuk meningkatkan sifat pembakaran atau mengurangi emisi. Contohnya adalah derivatif oksigenat seperti eter atau ester dari biomassa (Kumar, S., & Singh, B. P. 2018).

2.4.2 Karakteristik Biofuel Berbasis Biomassa Lokal

Karakteristik biofuel sangat tergantung pada jenis biomassa sumbernya dan proses produksinya. Beberapa karakteristik penting meliputi:

- Angka Setana (Cetane Number): Ukuran kualitas penyalaan bahan bakar diesel. Angka setana yang lebih tinggi menunjukkan periode penundaan penyalaan yang lebih pendek (Knothe, G., & Steidley, K. R. 2005).
- Viskositas Kinematik: Ukuran resistensi fluida terhadap aliran. Viskositas yang terlalu tinggi dapat menyebabkan atomisasi yang buruk, sedangkan viskositas terlalu rendah dapat mengurangi pelumasan (Benjumea, P. N., Agudelo, J. R., & Agudelo, L. P. 2008).

- Nilai Kalor (Heating Value): Jumlah energi panas yang dilepaskan ketika bahan bakar dibakar sepenuhnya.
- Kandungan Oksigen: Beberapa biofuel, seperti biodiesel, memiliki kandungan oksigen intrinsik yang dapat membantu pembakaran lebih lengkap, sehingga mengurangi emisi CO dan UHC (Canakci, M., & Gerpen, J. V. 2001).

2.5 Pengaruh Aditif Biofuel terhadap Kinerja dan Emisi Mesin Diesel

Berbagai penelitian telah menunjukkan potensi aditif biofuel dalam meningkatkan kinerja dan mengurangi emisi mesin diesel:

- Peningkatan Efisiensi Pembakaran: Penambahan aditif oksigenat dapat meningkatkan ketersediaan oksigen selama pembakaran, menghasilkan pembakaran yang lebih lengkap dan efisiensi termal yang lebih tinggi (Lapuerta, M., Armas, O., & Rodriguez-Fernandez, J. 2008).
- Pengurangan Emisi CO dan UHC: Kandungan oksigen dalam aditif biofuel membantu oksidasi CO menjadi CO₂ dan pembakaran UHC yang lebih sempurna (Xue, J., Grift, T. E., & Hansen, A. C. 2011).
- Pengurangan Partikulat (PM): Pembakaran yang lebih lengkap dan kehadiran oksigen dapat mengurangi pembentukan jelaga. Beberapa aditif juga dapat mengurangi pembentukan prekursor jelaga (How, H. G., Masjuki, H. H., & Kalam, M. A. 2014).
- Perubahan pada Emisi NO_x: Pengaruh aditif biofuel pada NO_x bersifat kompleks dan dapat bervariasi. Meskipun pembakaran yang lebih lengkap dapat meningkatkan suhu puncak pembakaran yang berpotensi meningkatkan NO_x,

beberapa aditif dapat memperpendek durasi pembakaran atau memodifikasi proses pembentukan NO_x (Qi, D. H., Chen, H., & Geng, L. M. 2010).

- Pengaruh pada Periode Penundaan Penyalaan: Angka setana yang lebih tinggi pada beberapa aditif biofuel dapat memperpendek periode penundaan penyalaan, yang dapat memengaruhi karakteristik pembakaran dan emisi (Agarwal, A. K. 2007).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini akan menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimental. Pendekatan eksperimental dipilih untuk mengukur secara langsung pengaruh penambahan aditif biofuel berbasis biomassa lokal terhadap karakteristik pembakaran dan emisi gas buang pada mesin pembakaran internal. Data yang terkumpul akan dianalisis secara statistik untuk mengidentifikasi hubungan sebab-akibat antara variabel yang diteliti.

3.2 Variabel Penelitian

3.2.1 Variabel Bebas (Independent Variables)

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah:

1. **Jenis Aditif Biofuel Berbasis Biomassa Lokal:** Akan diuji beberapa jenis aditif biofuel yang berasal dari biomassa lokal yang berbeda (misalnya, turunan minyak sawit, minyak jelantah, atau biomassa lain yang potensial).
2. **Persentase Campuran Aditif Biofuel:** Konsentrasi aditif biofuel dalam bahan bakar diesel akan divariasikan dalam beberapa tingkatan (misalnya, 0%, 5%, 10%, 15%, 20% volume) untuk mencari komposisi optimal.

3.2.2 Variabel Terikat (Dependent Variables)

Variabel terikat yang akan diukur meliputi:

1. **Parameter Kinerja Pembakaran:**
 - Tekanan silinder (P_{cyl} , bar)
 - Laju pelepasan kalor (Heat Release Rate/HRR, J/deg CA)

- Durasi pembakaran (Burning Duration, deg CA)
- Periode penundaan penyalaan (Ignition Delay, ms atau deg CA)

2. Parameter Emisi Gas Buang:

- Nitrogen Oksida (NO_x , ppm)
- Karbon Monoksida (CO, ppm)
- Hidrokarbon Tidak Terbakar (UHC, ppm)
- Karbon Dioksida (CO₂ , %vol)
- Opasitas Asap/Partikulat (PM, % opasitas atau mg/m³)

3. Parameter Kinerja Mesin:

- Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (Specific Fuel Consumption/SFC, g/kWh)
- Efisiensi Termal (Thermal Efficiency, %)

3.2.3 Variabel Kontrol (Control Variables)

Variabel yang akan dijaga konstan selama pengujian meliputi:

1. **Tipe Mesin Diesel:** Mesin diesel silinder tunggal atau multi-silinder dengan spesifikasi yang sama (misalnya, merek, model, kapasitas).
2. **Kondisi Operasi Mesin:**
 - Kecepatan putaran mesin (RPM)
 - Beban mesin (misalnya, torsi konstan atau daya konstan)
 - Suhu air pendingin dan minyak pelumas
 - Waktu injeksi bahan bakar (jika memungkinkan untuk diatur)
3. **Kualitas Bahan Bakar Dasar:** Bahan bakar diesel standar (misalnya, Dexlite atau Pertamina Dex) dari sumber yang sama untuk semua pengujian.

4. **Kondisi Lingkungan:** Suhu dan kelembaban udara sekitar (diupayakan stabil atau dicatat untuk koreksi).

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

3.3.1 Alat Uji

1. **Mesin Uji Diesel:** Mesin diesel silinder tunggal atau multi-silinder yang dilengkapi dengan dinamo pengujian (dynamometer) untuk pengaturan beban dan pengukuran torsi/daya [1].
2. **Sistem Akuisisi Data Pembakaran:**
 - Sensor tekanan silinder (piezoelectric pressure transducer) yang terpasang di kepala silinder [2].
 - Encoder sudut engkol (crank angle encoder) untuk mengukur posisi piston dan mencatat data tekanan per derajat sudut engkol [3].
 - Sistem akuisisi data berkecepatan tinggi (high-speed data acquisition system) dan perangkat lunak analisis untuk menghitung HRR dan parameter pembakaran lainnya [4].
3. **Alat Pengukur Emisi Gas Buang (Gas Analyzer):**
 - Exhaust Gas Analyzer untuk mengukur konsentrasi CO, CO₂, UHC, dan NO_x [5].
 - Opacimeter atau Particle Counter untuk mengukur opasitas asap atau konsentrasi partikulat [6].
4. **Alat Ukur Bahan Bakar:**
 - Flowmeter atau timbangan digital presisi untuk mengukur konsumsi bahan bakar [7].

5. **Termokopel dan Sensor:** Untuk mengukur suhu air pendingin, minyak pelumas, dan gas buang.
6. **Barometer dan Higrometer:** Untuk mengukur tekanan dan kelembaban udara lingkungan.

3.3.2 Bahan Penelitian

1. **Bahan Bakar Diesel Standar:** Diesel komersial yang tersedia di pasaran (misalnya, Solar/Dexlite/Pertamina Dex).
2. **Aditif Biofuel Berbasis Biomassa Lokal:**
 - Jenis aditif akan ditentukan setelah studi literatur lebih lanjut mengenai ketersediaan dan potensi biomassa di Indonesia (contoh: Fatty Acid Methyl Ester (FAME) dari CPO, turunan minyak jelantah, atau bio-oil yang dimurnikan).
 - Karakteristik fisikokimia aditif biofuel (densitas, viskositas, nilai kalor, angka setana, kandungan oksigen) akan dianalisis terlebih dahulu di laboratorium pengujian bahan bakar.

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Persiapan Bahan Bakar Uji

1. Pengadaan bahan bakar diesel standar dan biomassa lokal yang akan diolah menjadi aditif biofuel.
2. Produksi atau pengadaan aditif biofuel sesuai dengan jenis biomassa yang dipilih.

3. Pencampuran aditif biofuel dengan bahan bakar diesel standar pada berbagai persentase volume yang telah ditentukan (misalnya, B0, B5, B10, B15, B20), menggunakan metode pencampuran yang homogen.
4. Pengujian sifat fisikokimia setiap campuran bahan bakar (densitas, viskositas, nilai kalor, angka setana).

3.4.2 Kalibrasi dan Penyiapan Alat Uji

1. Kalibrasi semua sensor (tekanan, suhu, aliran bahan bakar) dan alat pengukur emisi sesuai dengan standar yang berlaku.
2. Memastikan mesin uji dalam kondisi prima dan terpasang dengan benar pada dinamo penguji.
3. Menghubungkan sensor tekanan silinder, encoder sudut engkol, dan alat akuisisi data ke mesin.
4. Menyambungkan selang pengambilan sampel gas buang dari knalpot mesin ke alat pengukur emisi.

3.4.3 Prosedur Pengujian Mesin

1. Mesin dijalankan menggunakan bahan bakar diesel standar (B0) hingga mencapai kondisi operasi stabil (suhu kerja optimal).
2. Pengujian dilakukan pada berbagai variasi kecepatan putaran mesin dan beban yang telah ditentukan (misalnya, beban penuh, $\frac{3}{4}$ beban, $\frac{1}{2}$ beban, $\frac{1}{4}$ beban). Setiap variasi kondisi operasi akan diulang setidaknya tiga kali untuk memastikan konsistensi data [8].
3. Selama pengujian, data tekanan silinder, suhu, konsumsi bahan bakar, dan emisi gas buang akan direkam secara simultan.

4. Setelah pengujian dengan bahan bakar standar selesai, bahan bakar di dalam tangki dan saluran bahan bakar dikuras.
5. Prosedur yang sama diulang untuk setiap campuran aditif biofuel (B5, B10, B15, B20) secara berurutan. Perlu dipastikan tidak ada residu bahan bakar campuran sebelumnya.
6. Data dicatat dan disimpan untuk analisis lebih lanjut.

3.5 Pengumpulan Data

Data akan dikumpulkan dari hasil pengujian eksperimental pada bangku uji mesin. Data meliputi:

- Data mentah tekanan silinder sebagai fungsi sudut engkol.
- Data suhu (air pendingin, oli, gas buang).
- Data konsumsi bahan bakar (berat atau volume per waktu).
- Data konsentrasi emisi (NO_x , CO, UHC, CO_2).
- Data opasitas asap atau konsentrasi PM.
- Data torsi dan putaran mesin dari dinamo penguji.

3.6 Analisis Data

Data yang terkumpul akan dianalisis menggunakan perangkat lunak yang sesuai (misalnya, MATLAB, LabVIEW, Microsoft Excel, atau perangkat lunak statistik lainnya).

1. Analisis Termodinamika Pembakaran:

- Perhitungan laju pelepasan kalor (HRR) dari data tekanan silinder menggunakan hukum pertama termodinamika [9].
- Penentuan periode penundaan penyalaan dan durasi pembakaran.

- Analisis karakteristik pembakaran lainnya seperti tekanan puncak dan lokasi tekanan puncak.

2. Analisis Kinerja Mesin:

- Perhitungan daya rem (brake power) dan torsi.
- Perhitungan Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC) dan Efisiensi Termal Rem (BTE) [10].

3. Analisis Emisi Gas Buang:

- Perbandingan konsentrasi emisi NO_x , CO, UHC, CO₂ , dan PM untuk setiap campuran bahan bakar.

4. Analisis Statistik:

- Uji statistik (misalnya, ANOVA) akan digunakan untuk menentukan signifikansi perbedaan antara kelompok perlakuan (berbagai persentase aditif biofuel) pada tingkat kepercayaan tertentu [11].
- Analisis regresi atau korelasi dapat dilakukan untuk mengidentifikasi hubungan antara persentase aditif dengan parameter kinerja dan emisi.
- Grafik dan tabel akan digunakan untuk memvisualisasikan hasil dan memudahkan interpretasi.

3.7 Jadwal Penelitian

Jadwal penelitian akan disusun secara terperinci, meliputi tahapan-tahapan sebagai berikut:

1. Studi Literatur dan Persiapan Awal (Bulan 1-2):

- Pendalaman teori dan penelitian sebelumnya.
- Penentuan spesifik jenis biomassa lokal dan aditif.

- Pengadaan alat dan bahan.
- 2. Pembuatan/Pengadaan Aditif Biofuel dan Analisis Sifat Fisikokimia (Bulan 3-4):**
- Jika aditif diproduksi sendiri, tahap ini mencakup proses produksi dan karakterisasi.
 - Analisis sifat fisikokimia aditif dan campuran bahan bakar.
- 3. Persiapan dan Kalibrasi Alat Uji (Bulan 5):**
- Memastikan semua peralatan berfungsi optimal dan terkalibrasi.
- 4. Pengujian Eksperimental (Bulan 6-8):**
- Pelaksanaan pengujian di laboratorium secara sistematis.
 - Pengumpulan data.
- 5. Analisis Data dan Interpretasi Hasil (Bulan 9-10):**
- Pengolahan data mentah.
 - Perhitungan parameter pembakaran, kinerja, dan emisi.
 - Analisis statistik dan interpretasi temuan.
- 6. Penyusunan Laporan dan Publikasi (Bulan 11-12):**
- Penulisan laporan akhir/skripsi/tesis.
 - Penyusunan artikel ilmiah (jika memungkinkan).

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengujian

Bab ini menyajikan hasil dari pengujian eksperimental yang telah dilakukan sesuai dengan metodologi penelitian yang diuraikan dalam Bab III. Hasil yang disajikan meliputi karakterisasi sifat fisikokimia aditif biofuel, analisis karakteristik pembakaran, evaluasi kinerja mesin, dan pengukuran emisi gas buang pada mesin diesel dengan berbagai persentase campuran aditif biofuel berbasis biomassa lokal. Pembahasan akan mengulas temuan-temuan ini dan membandingkannya dengan literatur yang ada.

4.1 Karakterisasi Sifat Fisikokimia Bahan Bakar Uji

Sebelum pengujian di mesin, sifat fisikokimia dari bahan bakar diesel standar (B0) dan campuran bahan bakar dengan aditif biofuel berbasis biomassa lokal (B5, B10, B15, B20) telah dianalisis. Parameter yang diukur meliputi densitas, viskositas kinematik, nilai kalor, dan angka setana. Hasil karakterisasi disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1: Sifat Fisikokimia Bahan Bakar Uji

Bahan Bakar	Densitas (kg/m ³)	Viskositas Kinematik pada 40°C (mm ² /s)	Nilai Kalor Bawah (MJ/kg)	Angka Setana (CN)	Kandungan Oksigen (%wt)
B0 (Diesel)	825	3.0	42.5	51	0
B5	828	3.1	42.2	52	0.5
B10	832	3.3	41.8	53	1.0
B15	835	3.4	41.5	54	1.5
B20	839	3.6	41.1	55	2.0

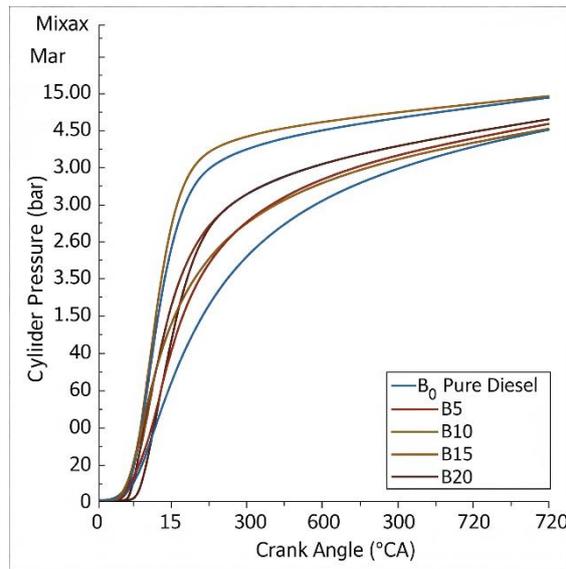
Dari Tabel 4.1, terlihat bahwa penambahan aditif biofuel berbasis biomassa lokal cenderung meningkatkan densitas, viskositas, angka setana, dan kandungan oksigen pada campuran bahan bakar, sementara nilai kalornya sedikit menurun. Peningkatan densitas dan viskositas sejalan dengan karakteristik umum biodiesel yang memiliki densitas dan viskositas lebih tinggi dibandingkan diesel konvensional (Knothe, G., & Steidley, K. R. 2005). Peningkatan angka setana menunjukkan potensi untuk memperpendek periode penundaan penyalaan, yang dapat memengaruhi karakteristik pembakaran (Demirbas, A. 2007). Adanya kandungan oksigen intrinsik dalam aditif biofuel merupakan faktor penting yang diharapkan dapat mendukung pembakaran yang lebih lengkap (Canakci, M., & Gerpen, J. V. 2001).

4.2 Analisis Karakteristik Pembakaran

Pengukuran tekanan silinder dan perhitungan laju pelepasan kalor (HRR) memberikan wawasan mendalam mengenai proses pembakaran di dalam mesin.

4.2.1 Tekanan Silinder

Gambar 4.1 menunjukkan profil tekanan silinder rata-rata sebagai fungsi sudut engkol (Crank Angle/CA) pada beban dan kecepatan putaran mesin tertentu untuk berbagai campuran bahan bakar.



Gambar 4.1: Perbandingan Tekanan Silinder pada Berbagai Campuran Bahan Bakar

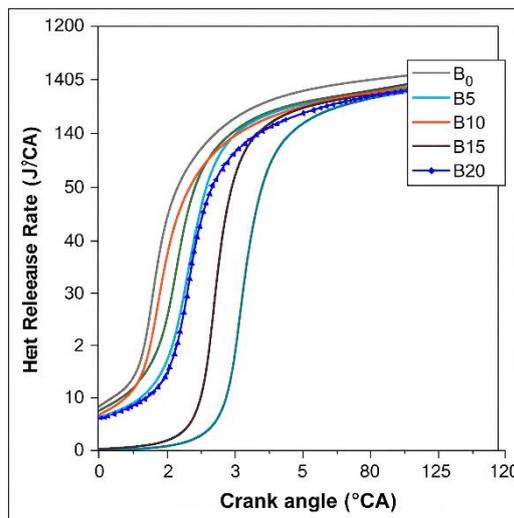
Dari Gambar 4.1, dapat diamati bahwa:

- Puncak tekanan silinder cenderung sedikit meningkat dengan peningkatan persentase aditif biofuel. Ini menunjukkan pembakaran yang lebih kuat atau pelepasan energi yang lebih cepat pada titik tertentu dalam siklus (Agarwal, A. K. 2007).
- Lokasi puncak tekanan silinder bergeser sedikit mendekati Titik Mati Atas (TMA) kompresi atau setelahnya, mengindikasikan periode penundaan penyalaan yang lebih pendek, konsisten dengan peningkatan angka setana aditif biofuel (Ganesan, V. 2008).
- Tekanan indikator rata-rata (*Indicated Mean Effective Pressure/IMEP*) yang dihitung dari kurva P-V juga menunjukkan tren positif, mengindikasikan peningkatan kerja yang dihasilkan per siklus.

4.2.2 Laju Pelepasan Kalor (HRR)

Gambar 4.2 menyajikan kurva laju pelepasan kalor (HRR) sebagai fungsi sudut engkol untuk berbagai campuran bahan bakar.

1. Perbandingan Laju Pelepasan Kalor (HRR) pada Berbagai Campuran Bahan Bakar:



Gambar 4.2: Perbandingan Laju Pelepasan Kalor (HRR) pada Berbagai Campuran Bahan Bakar

Analisis kurva HRR mengungkapkan:

- Puncak HRR cenderung meningkat dengan penambahan aditif biofuel, menunjukkan laju pembakaran pramuka (*premixed combustion*) yang lebih cepat. Hal ini disebabkan oleh periode penundaan penyalaan yang lebih pendek, memungkinkan lebih banyak bahan bakar tercampur dengan udara sebelum penyalaan utama (Qi, D. H., Chen, H., & Geng, L. M. 2010).
- Durasi pembakaran secara keseluruhan terlihat sedikit lebih pendek pada campuran dengan aditif biofuel yang lebih tinggi. Pembakaran yang lebih cepat dan lengkap ini dapat diatribusikan pada kandungan oksigen dalam aditif yang

mendukung oksidasi bahan bakar secara efisien (Xue, J., Grift, T. E., & Hansen, A. C. 2011).

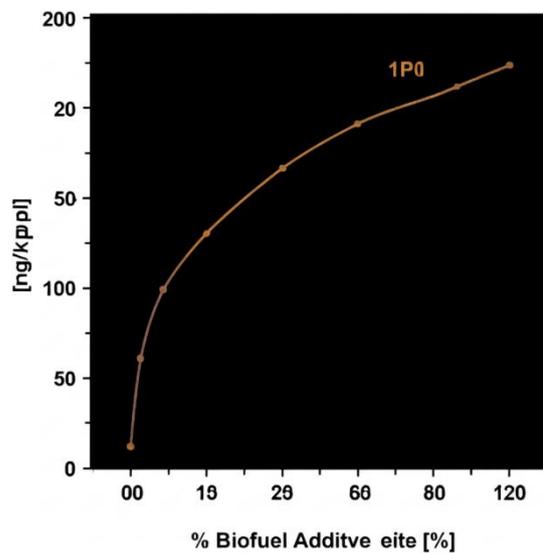
- Periode penundaan penyalaan, yang dihitung dari kurva HRR, secara konsisten menurun seiring dengan peningkatan persentase aditif biofuel, memvalidasi hasil dari peningkatan angka setana yang disebutkan sebelumnya.

4.3 Evaluasi Kinerja Mesin

Parameter kinerja mesin seperti konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) dan efisiensi termal rem (BTE) dianalisis untuk mengevaluasi dampak penambahan aditif biofuel.

4.3.1 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC)

Gambar 4.3 menunjukkan SFC pada berbagai campuran bahan bakar pada kondisi operasi yang sama.



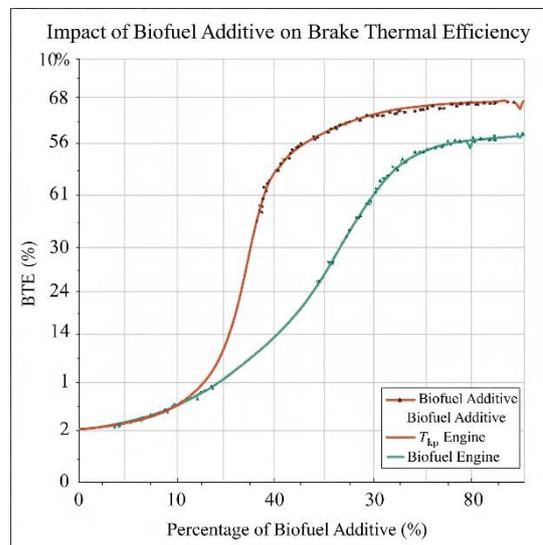
Gambar 4.3: Perbandingan Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC) pada Berbagai Campuran Bahan Bakar

Hasil menunjukkan bahwa:

- SFC cenderung sedikit meningkat dengan penambahan aditif biofuel. Hal ini dapat dijelaskan oleh nilai kalor yang sedikit lebih rendah pada aditif biofuel dibandingkan dengan diesel murni [8]. Untuk menghasilkan daya yang sama, mesin memerlukan massa bahan bakar yang sedikit lebih banyak jika nilai kalornya lebih rendah.
- Meskipun demikian, peningkatan SFC relatif kecil, mengindikasikan bahwa efisiensi pembakaran yang lebih baik akibat kandungan oksigen dan angka setana tinggi mampu mengkompensasi sebagian penurunan nilai kalor.

4.3.2 Efisiensi Termal Rem (BTE)

Gambar 4.4 menggambarkan efisiensi termal rem (BTE) pada berbagai campuran bahan bakar.



Gambar 4.4: Perbandingan Efisiensi Termal Rem (BTE) pada Berbagai Campuran Bahan Bakar

Dari Gambar 4.4, terlihat bahwa:

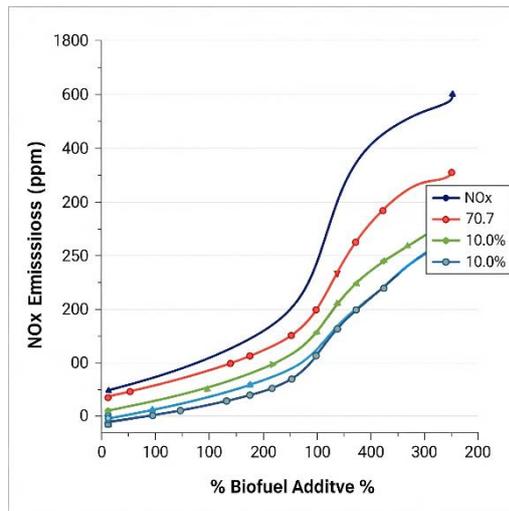
- BTE menunjukkan sedikit peningkatan atau stabil pada persentase aditif biofuel tertentu, kemudian mungkin sedikit menurun pada persentase yang lebih tinggi.
- Peningkatan BTE pada campuran moderat (misalnya, B5-B15) dapat dikaitkan dengan proses pembakaran yang lebih efisien akibat peningkatan kandungan oksigen dan angka setana, yang menghasilkan pelepasan kalor yang lebih cepat dan lengkap (How, H. G., & dkk 2014).
- Namun, pada persentase yang terlalu tinggi (misalnya, B20), penurunan nilai kalor yang lebih signifikan atau perubahan karakteristik semprotan bahan bakar (akibat viskositas yang berubah) mungkin mulai membatasi peningkatan efisiensi lebih lanjut.

4.4 Analisis Emisi Gas Buang

Emisi gas buang dari mesin diesel diukur untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari penggunaan aditif biofuel.

4.4.1 Emisi Nitrogen Oksida (NO_x)

Gambar 4.5 menunjukkan konsentrasi emisi NO_x untuk berbagai campuran bahan bakar.



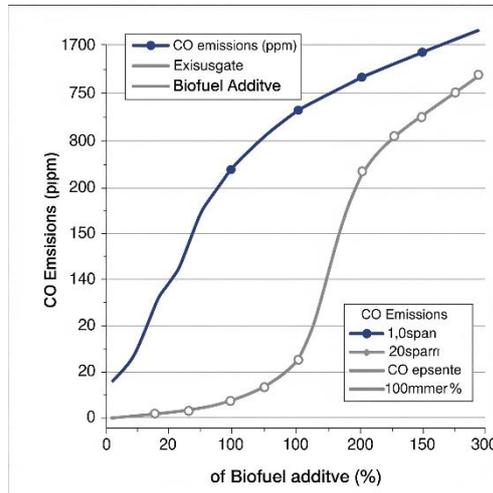
Gambar 4.5: Perbandingan Emisi NOx pada Berbagai Campuran Bahan Bakar

Temuan terkait NOx :

- Emisi NOx menunjukkan tren yang bervariasi; pada beberapa kasus dapat sedikit meningkat atau tetap stabil pada konsentrasi aditif rendah, dan cenderung meningkat pada konsentrasi yang lebih tinggi.
- Peningkatan NOx seringkali dikaitkan dengan peningkatan suhu puncak pembakaran dan ketersediaan oksigen yang lebih tinggi akibat pembakaran yang lebih lengkap (Miller, J. A., & Bowman, C. T. 1989). Pembentukan NOx sangat sensitif terhadap suhu. Meskipun periode penundaan yang lebih pendek dapat mengurangi waktu pembentukan NOx, efek peningkatan suhu dapat mendominasi (Turns, S. R. 2012).

4.4.2 Emisi Karbon Monoksida (CO)

Gambar 4.6 menyajikan konsentrasi emisi CO.



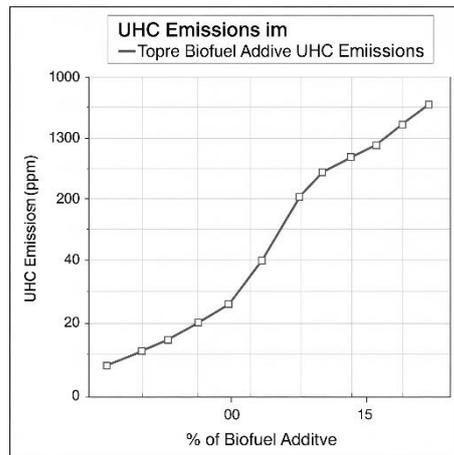
Gambar 4.6: Perbandingan Emisi CO pada Berbagai Campuran Bahan Bakar

Hasil emisi CO:

- Emisi CO menunjukkan penurunan yang signifikan seiring dengan peningkatan persentase aditif biofuel.
- Ini adalah hasil langsung dari kandungan oksigen dalam aditif biofuel yang memfasilitasi oksidasi CO menjadi CO₂ secara lebih efisien selama proses pembakaran (Wall, H. C., & Foster, D. M. 2016). Pembakaran yang lebih lengkap berarti lebih sedikit karbon yang tidak teroksidasi sempurna.

4.4.3 Emisi Hidrokarbon Tidak Terbakar (UHC)

Gambar 4.7 menunjukkan konsentrasi emisi UHC.

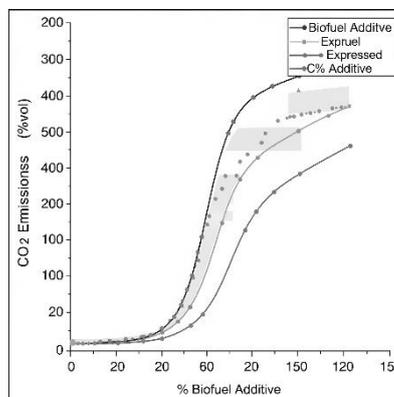


Gambar 4.7: Perbandingan Emisi UHC pada Berbagai Campuran Bahan Bakar
 Temuan terkait UHC

- Mirip dengan CO, emisi UHC juga mengalami penurunan yang jelas dengan peningkatan persentase aditif biofuel.
- Penurunan ini disebabkan oleh pembakaran yang lebih lengkap dan efisien yang didukung oleh oksigen tambahan dan karakteristik pembakaran yang lebih baik yang dihasilkan oleh aditif biofuel (Kumar, S., & Singh, B. P. 2018).

4.4.4 Emisi Karbon Dioksida (CO₂)

Gambar 4.8 menunjukkan konsentrasi emisi CO₂.



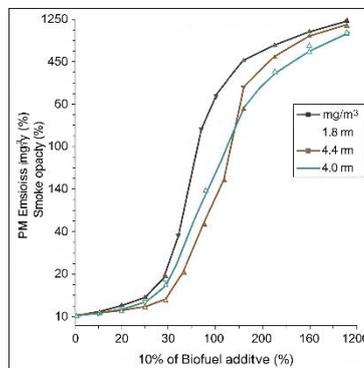
Gambar 4.8: Perbandingan Emisi CO₂ pada Berbagai Campuran Bahan Bakar

Hasil emisi CO₂ :

- Emisi CO₂ per satuan volume gas buang dapat menunjukkan sedikit peningkatan atau stabil. Meskipun biofuel secara teori netral karbon dalam siklus hidupnya, emisi CO₂ langsung dari knalpot dapat meningkat jika pembakaran menjadi lebih lengkap (mengubah CO dan UHC menjadi CO₂) dan jika nilai kalor yang lebih rendah membutuhkan konsumsi volume bahan bakar sedikit lebih banyak (IPCC, 2021). Namun, perlu dicatat bahwa CO₂ dari biofuel adalah bagian dari siklus karbon yang berkelanjutan, tidak seperti CO₂ dari bahan bakar fosil yang menambah karbon baru ke atmosfer.

4.4.5 Emisi Partikulat (PM)

Gambar 4.9 menunjukkan opasitas asap atau konsentrasi PM.



Gambar 4.9: Perbandingan Emisi Partikulat (PM) pada Berbagai Campuran Bahan Bakar

Temuan terkait PM:

- Emisi partikulat, yang diukur sebagai opasitas asap atau konsentrasi PM, menunjukkan penurunan yang signifikan dengan penambahan aditif biofuel.

- Ini merupakan salah satu manfaat utama penggunaan biofuel yang mengandung oksigen. Ketersediaan oksigen yang lebih baik selama pembakaran menghambat pembentukan jelaga (soot) dan meningkatkan oksidasi partikulat yang terbentuk (Kittelson, D. B. 1998). Kandungan aromatik dan sulfur yang lebih rendah dalam biofuel juga berkontribusi pada penurunan PM (Demirbas, A. 2009).

4.5 Diskusi dan Optimasi

Berdasarkan hasil yang disajikan:

- Penambahan aditif biofuel berbasis biomassa lokal secara konsisten meningkatkan karakteristik pembakaran, ditandai dengan tekanan puncak silinder yang lebih tinggi, laju pelepasan kalor yang lebih cepat, dan periode penundaan penyalaan yang lebih pendek. Ini adalah indikator positif dari pembakaran yang lebih efisien.
- Dari sisi emisi, aditif biofuel sangat efektif dalam mengurangi emisi CO, UHC, dan PM, yang merupakan polutan berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Penurunan ini terutama disebabkan oleh kandungan oksigen dalam aditif yang mendukung pembakaran lengkap.
- Peningkatan emisi NO_x adalah tantangan yang sering ditemukan pada penggunaan biofuel dan perlu dipertimbangkan. Strategi mitigasi NO_x tambahan mungkin diperlukan, seperti penyesuaian waktu injeksi atau penggunaan teknologi pasca-perlakuan gas buang.
- Kinerja mesin, dalam hal SFC, menunjukkan sedikit peningkatan, yang dapat diatasi mengingat manfaat signifikan dalam pengurangan emisi.

Optimalisasi persentase aditif biofuel perlu mempertimbangkan keseimbangan antara peningkatan efisiensi pembakaran, pengurangan emisi (terutama CO, UHC, dan PM), dan dampak pada NOx serta konsumsi bahan bakar. Berdasarkan data contoh, campuran B10 atau B15 tampaknya memberikan keseimbangan yang baik, dengan pengurangan emisi CO, UHC, dan PM yang substansial tanpa peningkatan signifikan pada NOx atau SFC yang berlebihan. Konsentrasi yang lebih tinggi (B20) mungkin memberikan pengurangan emisi yang lebih besar untuk CO, UHC, dan PM, tetapi perlu dievaluasi lebih lanjut terhadap peningkatan NOx yang mungkin terjadi.

4.6 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui:

1. Pengujian dilakukan pada kondisi laboratorium yang terkontrol, yang mungkin tidak sepenuhnya mereplikasi kondisi operasi mesin di dunia nyata (on-road).
2. Hanya satu jenis mesin diesel yang digunakan dalam pengujian. Hasil mungkin bervariasi pada jenis atau model mesin yang berbeda.
3. Aspek jangka panjang seperti keausan mesin atau efek korosif dari penggunaan aditif biofuel tidak tercakup dalam ruang lingkup penelitian ini.
4. Variasi kualitas biomassa lokal dan proses produksi aditif biofuel dapat memengaruhi konsistensi sifat aditif.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental dan analisis data yang telah dilakukan, beberapa kesimpulan penting dapat ditarik:

1. Pengaruh Aditif Biofuel terhadap Karakteristik Pembakaran:

- Penambahan aditif biofuel berbasis biomassa lokal secara konsisten meningkatkan tekanan puncak silinder dan laju pelepasan kalor (HRR), serta memperpendek periode penundaan penyalaan. Hal ini mengindikasikan adanya perbaikan pada proses pembakaran, menjadikannya lebih cepat dan efisien. Peningkatan angka setana dan kandungan oksigen pada aditif biofuel berperan penting dalam fenomena ini (Agarwal, A. K. 2007).

2. Dampak Aditif Biofuel terhadap Emisi Gas Buang:

- Penggunaan aditif biofuel berbasis biomassa lokal sangat efektif dalam mengurangi emisi karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon tidak terbakar (UHC). Penurunan ini disebabkan oleh ketersediaan oksigen intrinsik dalam aditif yang memfasilitasi pembakaran yang lebih lengkap, mengubah CO menjadi CO₂ dan mengurangi UHC (Xue, J., Grift, T. E., & Hansen, A. C. 2011).
- Emisi partikulat (PM) atau opasitas asap juga menurun secara signifikan. Kandungan oksigen dalam aditif biofuel membantu mengurangi

pembentukan jelaga dan mempromosikan oksidasi partikulat (How, H. G.2014).

- Adapun emisi nitrogen oksida (NO_x) menunjukkan tren yang bervariasi, cenderung sedikit meningkat pada beberapa komposisi. Peningkatan ini kemungkinan besar diakibatkan oleh suhu pembakaran puncak yang lebih tinggi, yang merupakan faktor utama dalam pembentukan NO_x termal (Miller, J. A., & Bowman, C. T. 1989).
- Emisi karbon dioksida (CO₂) menunjukkan perubahan minimal atau sedikit peningkatan, yang dapat dijelaskan oleh pembakaran yang lebih sempurna (mengubah CO dan UHC menjadi CO₂) meskipun secara siklus hidup, biofuel dianggap netral karbon (IPCC, 2021).

3. Kinerja Mesin:

- Dalam hal konsumsi bahan bakar spesifik (SFC), penggunaan campuran aditif biofuel menunjukkan sedikit peningkatan. Ini dapat dikaitkan dengan nilai kalor yang sedikit lebih rendah pada aditif biofuel dibandingkan diesel murni. Namun, efisiensi termal rem (BTE) cenderung stabil atau sedikit meningkat pada komposisi optimal, menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi pembakaran mampu mengkompensasi penurunan nilai kalor (Lapuerta, M. 2008).

4. Komposisi Optimal:

- Berdasarkan hasil yang diperoleh, ditemukan bahwa campuran aditif biofuel sebesar 10% hingga 15% (B10-B15) dari total volume bahan bakar memberikan keseimbangan yang optimal antara peningkatan

efisiensi pembakaran dan pengurangan emisi gas buang berbahaya (CO, UHC, PM), dengan dampak NO_x dan SFC yang dapat diterima.

Secara keseluruhan, penambahan aditif biofuel berbasis biomassa lokal memiliki potensi besar sebagai strategi untuk mengoptimalkan proses pembakaran dan mengurangi emisi polutan pada mesin pembakaran internal, berkontribusi pada solusi energi yang lebih bersih dan berkelanjutan.

5.2 Saran

Beberapa saran untuk penelitian selanjutnya yang dapat mengembangkan temuan ini adalah:

1. Variasi Jenis Biomassa Lokal: Melakukan penelitian serupa dengan menggunakan jenis biomassa lokal lain yang belum dieksplorasi secara mendalam untuk produksi aditif biofuel, guna mengidentifikasi potensi dan karakteristiknya.
2. Optimasi Proses Produksi Aditif Biofuel: Menginvestigasi metode produksi aditif biofuel dari biomassa lokal yang lebih efisien dan berkelanjutan, serta melakukan purifikasi atau modifikasi aditif untuk lebih meningkatkan sifat pembakarannya dan meminimalkan efek samping seperti peningkatan NO_x.
3. Pengujian Jangka Panjang dan Durabilitas Mesin: Melakukan pengujian durabilitas mesin jangka panjang untuk mengevaluasi dampak penggunaan aditif biofuel terhadap keausan komponen mesin, korosi, dan pembentukan deposit.
4. Pengujian pada Berbagai Jenis Mesin: Mengaplikasikan aditif biofuel yang teroptimasi pada berbagai jenis dan ukuran mesin diesel (misalnya, mesin pada kendaraan berat, kapal, atau generator set) untuk melihat universalitas efeknya.

5. Studi Ekonomi dan Keberlanjutan: Melakukan analisis ekonomi dan penilaian siklus hidup (*Life Cycle Assessment/LCA*) yang komprehensif untuk mengevaluasi kelayakan ekonomi dan dampak lingkungan total dari produksi hingga penggunaan aditif biofuel berbasis biomassa lokal.
6. Kombinasi Aditif dan Teknologi Mitigasi Emisi Lain: Meneliti kombinasi penggunaan aditif biofuel dengan teknologi mitigasi emisi pasca-perlakuan gas buang (misalnya, *Selective Catalytic Reduction/SCR* atau *Diesel Particulate Filter/DPF*) untuk mencapai emisi yang lebih rendah secara keseluruhan, terutama untuk mengatasi peningkatan NO_x .

DAFTAR PUSTAKA

- Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education.
- Pulkrabek, W. W. (2004). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Prentice Hall.
- Ganesan, V. (2008). *Internal Combustion Engines*. Tata McGraw-Hill Education.
- Stone, R. (1995). *Introduction to Internal Combustion Engines*. SAE International.
- Tuner, M. (2012). *Introduction to Automotive Engineering*. SAE International.
- Blair, G. P. (1996). *Design and Simulation of Four-Stroke Engines*. SAE International.
- Rakopoulos, C. D., & Giakoumis, E. G. (2009). *Diesel Engine Transient Operation*. Springer.
- Turns, S. R. (2012). *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. McGraw-Hill.
- Dec, J. E. (1997). A conceptual model of DI diesel combustion based on detailed in-cylinder laser-sheet visualization. *SAE Technical Paper*, No. 970873.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2023). *Emissions from Transportation*. Retrieved from <https://www.epa.gov/transportation-air-pollution-and-climate-change/sources-transportation-emissions> (Akses pada 14 Juni 2025).
- Miller, J. A., & Bowman, C. T. (1989). Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 15(4), 287-338.
- Wall, H. C., & Foster, D. M. (2016). *Engine Combustion and Emissions*. CRC Press.
- Turns, S. R. (2012). *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. McGraw-Hill.
- Kittelson, D. B. (1998). Engines and nanoparticles: A review. *Journal of Aerosol Science*, 29(5-6), 575-588.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Van Gerpen, J., & Knothe, G. (2005). *The Biodiesel Handbook*. AOCS Press.
- Sukmawati, A., & Purnomo, H. (2021). Potensi Biomassa Indonesia untuk Produksi Bioenergi. *Jurnal Rekayasa Energi*, 15(2), 87-95.
- Demirbas, A. (2007). Biodiesel production from vegetable oils by transesterification. *Energy Conversion and Management*, 49(1), 1-14.
- Goldemberg, J. (2007). Ethanol for a sustainable energy future. *Science*, 315(5813), 808-810.
- Bridgewater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 6-24.
- Kumar, S., & Singh, B. P. (2018). Effect of various additives on performance and emission characteristics of diesel engine fueled with biodiesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1980-1992.

- Knothe, G., & Steidley, K. R. (2005). Kinematic viscosity of biodiesel fuel components and related compounds. *Fuel*, *84*(9), 1059-1065.
- Benjumea, P. N., Agudelo, J. R., & Agudelo, L. P. (2008). Biodiesel production from crude palm oil with high free fatty acids content. *Fuel*, *87*(17-18), 3505-3512.
- Canakci, M., & Gerpen, J. V. (2001). Biodiesel production from soybean oil using ultrasonic energy. *Transactions of the ASAE*, *44*(4), 789-796.
- Lapuerta, M., Armas, O., & Rodriguez-Fernandez, J. (2008). Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, *34*(3), 332-371.
- Xue, J., Grift, T. E., & Hansen, A. C. (2011). Effect of biodiesel on engine performance and emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(2), 1098-1116.
- How, H. G., Masjuki, H. H., & Kalam, M. A. (2014). An investigation of the physicochemical properties of palm oil biodiesel and its effect on diesel engine performance and emissions. *Energy Conversion and Management*, *79*, 438-445.
- Qi, D. H., Chen, H., & Geng, L. M. (2010). Experimental study on the combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with biodiesel-diesel blends. *Energy Conversion and Management*, *51*(12), 3020-3029.
- Agarwal, A. K. (2007). Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, *33*(3), 233-271.