

Gatot Setyono, ST., MT.

Prof. Dr. Moh. Khusaini, SE., M.Si., M.A

Prof. Widodo, S.Si., M.Si., Ph.D., Med.Sc

Prof. Dr. Slamet Wahyudi, ST., M.T



Teknologi *dan* Optimasi Bahan Bakar Alternatif



TEKNOLOGI DAN OPTIMASI BAHAN BAKAR ALTERNATIF

Penulis:

Gatot Setyono, ST., MT.

Prof. Dr. Moh. Khusaini, SE., M.Si., M.A

Prof. Widodo, S.Si., M.Si., Ph.D., Med.Sc

Prof. Dr. Slamet Wahyudi, ST., M.T



UU No. 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan Sifat Hak Cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Keterangan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan fonogram yang telah dilakukan pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000,00 (seratus juta rupiah).
2. Setiap orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

TEKNOLOGI DAN OPTIMASI BAHAN BAKAR ALTERNATIF

Gatot Setyono, ST., MT.
Prof. Dr. Moh. Khusaini, SE., M.Si., M.A
Prof. Widodo, S.Si., M.Si., Ph.D., Med.Sc
Prof. Dr. Slamet Wahyudi, ST., M.T

TATA LETAK:
Sari

DESAIN SAMPUL:
Adhar

SUMBER:
www.tdjpublisher.com

ISBN:
978-634-279-162-2 (PDF)

CETAKAN PERTAMA:
Juli 2026

UKURAN:
iii + 259 Hal; 17,6 cm x 25 cm

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang.
Dilarang menggandakan atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku
ini dalam bentuk apa pun tanpa izin tertulis dari penerbit dan penulis.

ANGGOTA IKAPI: 006/NTT/2022
TANGGUH DENARA JAYA PUBLISHER
Jl. Timor Raya No. 130 B, Kota Kupang, NTT
E-mail: tdj.denarapublisher@gmail.com

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga buku Teknologi dan Optimasi Bahan Bakar Alternatif ini dapat diselesaikan dengan baik. Buku ini disusun sebagai salah satu kontribusi dalam mendukung pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang energi, khususnya yang berkaitan dengan inovasi bahan bakar alternatif sebagai solusi atas meningkatnya kebutuhan energi dan tantangan lingkungan.

Peningkatan kebutuhan energi di sektor transportasi, yang diiringi dengan keterbatasan sumber energi fosil serta meningkatnya emisi gas buang, mendorong perlunya pengembangan bahan bakar alternatif yang lebih efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan. Berbagai inovasi dalam formulasi bahan bakar, pemanfaatan senyawa oksigenat, serta penerapan metode optimasi menjadi langkah strategis untuk meningkatkan performa mesin sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Buku ini menyajikan pembahasan yang komprehensif mengenai konsep dasar bahan bakar alternatif, karakteristik fisik dan kimia bahan bakar, mekanisme pembakaran pada mesin pembakaran dalam, pengaruh komposisi bahan bakar terhadap unjuk kerja mesin dan emisi gas buang, hingga penerapan metode pemodelan dan optimasi menggunakan Response Surface Methodology (RSM). Pembahasan tersebut diperkaya dengan hasil penelitian eksperimental, analisis ilmiah, serta studi kasus yang memberikan gambaran nyata mengenai pengembangan dan evaluasi bahan bakar alternatif untuk kendaraan bermotor.

Penyajian materi dalam buku ini dirancang secara sistematis dengan mengintegrasikan landasan teori, hasil penelitian, serta perkembangan teknologi terkini. Dengan demikian, buku ini diharapkan dapat menjadi referensi yang bermanfaat bagi mahasiswa, dosen, peneliti, praktisi, maupun pihak-pihak yang memiliki perhatian terhadap bidang teknik mesin, otomotif, energi, dan lingkungan. Selain memperluas wawasan akademik, buku ini juga diharapkan mampu mendorong lahirnya berbagai inovasi dalam pengembangan energi bersih yang mendukung terwujudnya sistem transportasi yang lebih efisien, berkelanjutan, dan berwawasan lingkungan.

Kupang, Juli 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	ii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
BAB II MESIN PEMBAKARAN DALAM (ICE) & RASIO KOMPRESI.....	6
BAB III BAHAN BAKAR DAN PEMBAKARAN	17
A. Bahan Bakar dan Pembakaran.....	17
B. Karakteristik Bahan Bakar terhadap Proses Pembakaran	19
C. Pengaruh Sifat Fisik–Kimia Bahan Bakar terhadap Performa dan Emisi.....	21
BAB IV BAHAN BAKAR ALTERNATIF BERBASIS MINYAK NABATI	23
A. Definisi dan Klasifikasi Bahan Bakar Alternatif	23
B. Minyak Nabati sebagai Bahan Bakar Kendaraan	23
C. Keunggulan dan Kendala Penggunaan Minyak Nabati	25
BAB V KARAKTERISTIK BAHAN BAKAR.....	27
A. Karakteristik Bahan Bakar Pertasol Pada Kendaraan Bermotor... ..	27
B. Karakteristik Bahan Bakar 2-butoksietanol Pada Kendaraan Bermotor	27
C. Karakteristik Bahan Bakar N-Butanol Pada Kendaraan Bermotor	29
D. Karakteristik Bahan Bakar Tamanu Oil Pada Kendaraan Bermotor	46
BAB VI CAMPURAN BAHAN BAKAR TERHADAP KINERJA MESIN	61
A. Kinerja dan Emisi Mesin pada Rasio Kompresi 9.5:1.....	61
B. Kinerja dan Emisi Mesin pada Rasio Kompresi 10:1.....	75
C. Kinerja dan Emisi Mesin pada Rasio Kompresi 11:1	91
D. Perbandingan Kinerja dan Emisi Mesin pada Berbagai Rasio Kompresi	104
BAB VII RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM) BERBASIS CENTRAL COMPOSITE DESIGN (CCD)	120
A. Respon dan Kontur Torsi (Torque).....	121
B. Respon dan Kontur Daya (Power).....	130
C. Respon dan Kontur Tekanan Efektif Rata-Rata (MEP)	139
D. Respon dan Kontur Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC).....	150
E. Respon dan Kontur Efisiensi Termal (TE).....	161
F. Respon dan Kontur Emisi CO.....	170

G. Respon dan Kontur Emisi HC	180
H. Respon dan Kontur Emisi NOx.	190
I. Optimasi Multi-Respon (Desirability) Model Response Surface Methodology (RSM)-Central Composite Design (CCD).	200
DAFTAR PUSTAKA.....	244

BAB I

PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, sistem energi global masih didominasi oleh pemanfaatan bahan bakar fosil, khususnya minyak bumi, yang memiliki tingkat konsumsi sangat tinggi dibandingkan sumber energi lainnya (Haider, 2020; Hou et al., 2023; Salkuti et al., 2022; Wolniak & Skotnicka-Zasadzień, 2023). Ketergantungan yang besar terhadap minyak bumi menjadikan bahan bakar ini sebagai komponen utama dalam pemenuhan kebutuhan energi, terutama dalam sektor transportasi melalui penggunaan bahan bakar minyak (BBM).

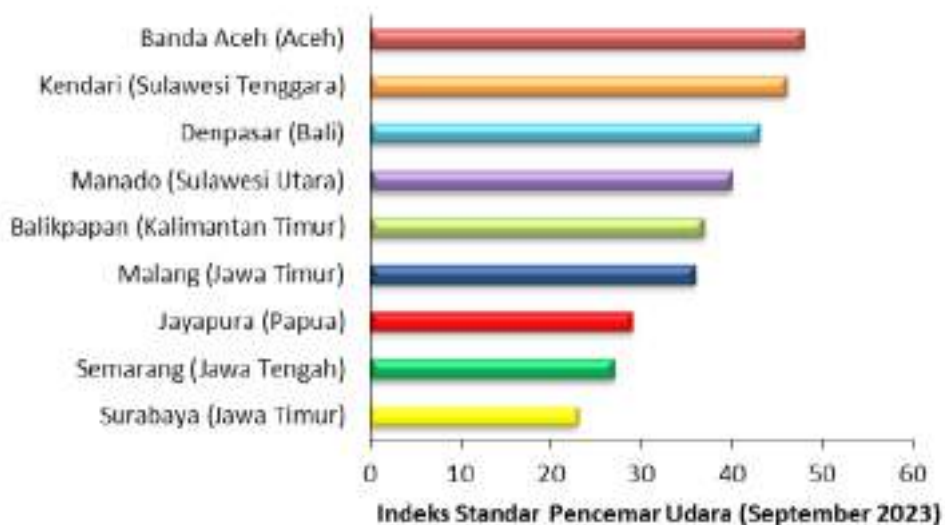
Peningkatan konsumsi BBM terjadi secara signifikan baik pada skala global maupun nasional. Kondisi ini dipengaruhi oleh pertumbuhan jumlah penduduk, perkembangan aktivitas ekonomi, serta meningkatnya kebutuhan energi di berbagai sektor. Di Indonesia, tren peningkatan konsumsi energi tidak sebanding dengan ketersediaan sumber daya minyak bumi yang cenderung menurun (Ichsan et al., 2022; Pablo-Romero et al., 2022; Zastempowski, 2023). Ketidakseimbangan antara suplai dan permintaan tersebut berimplikasi pada meningkatnya harga bahan bakar serta keterbatasan akses bagi sebagian masyarakat.

Dampak lanjutan dari kondisi tersebut adalah meningkatnya beban ekonomi, khususnya bagi kelompok masyarakat menengah ke bawah, akibat tingginya harga energi (Overland et al., 2022; Woo et al., 2021). Oleh karena itu, diperlukan upaya strategis dalam mengembangkan sumber energi alternatif yang berkelanjutan guna mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sekaligus meminimalkan potensi krisis energi di masa mendatang (Borowski, 2022; Resosudarmo et al., 2023; Simshauser, 2022).

Biofuel (Intruksi Presiden No. 1, 2006; Keputusan Dirjen Migas No. 23204, 2008; Permen ESDM No. 32, 2008) merupakan bentuk bahan bakar alternatif yang dewasa ini semakin dibutuhkan oleh masyarakat. Pemanfaatan biofuel juga akan mendukung tujuan Negara untuk mengelola sumber daya alam secara berkelanjutan, sebagaimana tercantum dalam UUD 1945 pasal 33 ayat 3. Hal ini berkaitan dengan kadar emisi di Indonesia yang semakin meningkat terutama di daerah perkotaan. Udara sudah dipenuhi dengan asap yang mengandung gas-gas berbahaya terhadap kesehatan lingkungan, sehingga mengakibatkan kualitas udara menurun dan lingkungan tidak berfungsi sebagaimana mestinya (Undang-Undang RI No. 23, 1997). Hal tersebut adalah dampak dari jumlah unit kendaraan bermotor yang dipastikan semakin bertambah dan tentunya berdampak terhadap emisi gas buang (Permen LHK No 14, 2020).

Perubahan iklim di Indonesia sangat mempengaruhi perekonomian, penduduk miskin, kesehatan manusia, dan lingkungan. Hal ini mempengaruhi emisi polutan udara karena emisi karbon dioksida (CO₂), karbon monoksida (CO), Nitrogen Oksida (NO_x) dan Sulfur Dioksida (SO₂) yang lebih tinggi telah menyebabkan polusi udara yang semakin buruk. Daerah perkotaan paling terkena dampak polusi udara, ditunjukkan gambar 1.1. Sektor transportasi memberikan kontribusi terbesar (80%) terhadap pencemaran udara, diikuti oleh emisi dari industri, kebakaran hutan, dan aktivitas rumah tangga (Haryanto, 2018; Huboyo et al., 2017; Lestari et al., 2020; Sitanggang et al., 2023; Widyaningrum et al., 2023). Banyaknya jumlah kendaraan dan kurangnya infrastruktur mengakibatkan

kemacetan lalu lintas yang besar sehingga mengakibatkan tingginya kadar zat pencemar udara, yang mempunyai dampak negatif yang signifikan terhadap kesehatan masyarakat (Hasan Shahariar et al., 2022; Khan et al., 2022; Lu et al., 2021). Masalah polusi udara saat ini merupakan masalah terbesar di kota-kota besar Indonesia karena menyebabkan 50% angka penyakit di seluruh negeri. Penyakit yang diakibatkan oleh emisi kendaraan dan polusi udara antara lain infeksi saluran pernapasan akut, asma bronkial, bronkitis, dan iritasi mata, kulit, kanker paru-paru, dan penyakit kardiovaskular. Prevalensi dan tingkat kejadian penyakit yang berhubungan dengan polusi udara diperkirakan akan menjadi lebih buruk dalam waktu dekat karena kisaran pertumbuhan konsumsi energi adalah sekitar 6–8% per tahun (Pratomo et al., 2023; Sakti et al., 2023)(Bej & Chattaraj, 2023) (Karliansyah, 2020).

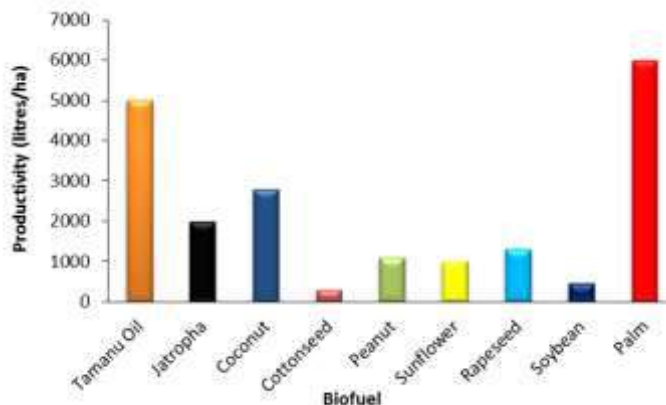


Gambar 1.1 Kualitas udara di kota-kota besar Indonesia (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), 2023)

Tanaman nyamplung (*Calophyllum inophyllum*) dikenal sebagai salah satu spesies pohon tropis yang memiliki potensi tinggi dalam pengembangan energi alternatif. Tanaman ini termasuk dalam kategori hasil hutan bukan kayu (HHBK) karena produk utamanya berasal dari bagian non-kayu, khususnya biji yang mengandung minyak dengan berbagai kegunaan (Leksono et al., 2014; Nurhidayanti, 2021; Vigneshwar et al., 2019). Kandungan minyak tersebut dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku biofuel, sehingga menjadikan nyamplung sebagai sumber energi nabati yang menjanjikan.

Selain potensi energinya, nyamplung memiliki karakteristik agronomis yang mendukung keberlanjutan pemanfaatannya. Tanaman ini mampu tumbuh pada berbagai kondisi lingkungan, termasuk wilayah pesisir dengan tingkat salinitas tinggi, serta memiliki kemampuan berbuah sepanjang tahun (Arumugam & Ponnusami, 2019; Ashok et al., 2018). Kemudahan dalam budidaya dan daya adaptasi yang baik terhadap lingkungan ekstrem menjadikan nyamplung sebagai tanaman yang relatif stabil dalam penyediaan bahan baku. Dari aspek pemanfaatan, hampir seluruh bagian tanaman nyamplung memiliki nilai guna dan

nilai ekonomi. Selain berperan sebagai sumber bahan baku energi, tanaman ini juga dapat dimanfaatkan sebagai penahan angin (wind barrier) pada kawasan pertanian serta sebagai vegetasi pelindung di daerah pesisir. Gambar 1.2. menunjukkan bahwa biji nyamplung tidak banyak dimanfaatkan oleh masyarakat bahkan tidak mengetahui jika biji nyamplung bisa dimanfaatkan dan diproses menjadi bahan bakar. Kapasitas minyak pada tamanu (Devarajan et al., 2022; Karmakar et al., 2010; Ong et al., 2011; Singh et al., 2020; Souza et al., 2018; Uppalapati et al., 2022).



Gambar 1.2 Hasil produksi minyak untuk berbagai sumber bahan baku biofuel dan biodiesel (Devarajan et al., 2022; Karmakar et al., 2010; Ong et al., 2011; Singh et al., 2020; Souza et al., 2018; Uppalapati et al., 2022)

Nyamplung (*Calophyllum inophyllum*) merupakan tanaman tropis dari famili Guttiferae yang umumnya tumbuh di wilayah pesisir, namun dalam kondisi tertentu juga dapat ditemukan di daerah daratan dengan karakteristik tanah berpasir hingga ketinggian sekitar 400 m di atas permukaan laut (Adma Adinugraha et al., 2012; Leksono et al., 2014; Prasetyawati & Mangopang, 2013). Penyebaran tanaman ini tergolong luas dan mencakup berbagai kawasan tropis di dunia, termasuk Afrika Timur, Asia Selatan dan Tenggara, Kepulauan Pasifik, serta Amerika Selatan. Di Indonesia, nyamplung tersebar di berbagai wilayah seperti Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, Sulawesi, Maluku, dan Papua dengan penamaan lokal yang beragam.

Salah satu pemanfaatan utama nyamplung adalah sebagai sumber minyak nabati yang berpotensi dikembangkan menjadi bahan bakar alternatif, khususnya biodiesel atau biofuel. Minyak yang diperoleh dari bijinya memiliki karakteristik yang mendukung untuk aplikasi energi, terutama karena ketersediaannya yang cukup melimpah di wilayah pesisir Indonesia. Selain itu, tanaman nyamplung umumnya tumbuh secara alami tanpa memerlukan perawatan intensif, sehingga berpotensi sebagai sumber bahan baku energi yang berkelanjutan.

Dibandingkan dengan beberapa tanaman penghasil minyak lainnya, nyamplung memiliki rendemen minyak yang relatif tinggi. Beberapa studi melaporkan bahwa kandungan minyak nyamplung dapat mencapai kisaran 40–73%, yang sebanding bahkan lebih tinggi dibandingkan tanaman lain seperti jarak pagar (40–60%) dan kelapa sawit (46–54%) (Syakir & Elna, 2013; Uppalapati et al., 2022; Vishali et al., 2023). Hal ini menunjukkan bahwa nyamplung memiliki prospek yang kompetitif sebagai bahan baku biofuel.