



**SIMULASI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DAN
EMISI MESIN DIESEL *DUAL-FUEL* BERBAHAN
BAKAR CAMPURAN HIDROGEN-METANA**

SKRIPSI

DYAS ISNAEN ILHAM

2210313062

**UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL VETERAN JAKARTA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK PERKAPALAN**

2026



**SIMULASI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DAN
EMISI MESIN DIESEL *DUAL-FUEL* BERBAHAN
BAKAR CAMPURAN HIDROGEN-METANA**

SKRIPSI

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik**

DYAS ISNAEN ILHAM

2210313062

**UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL VETERAN JAKARTA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK PERKAPALAN
2026**

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Dyas Isnaen Ilham

NIM : 2210313062

Program Studi : S1 Teknik Perkapalan

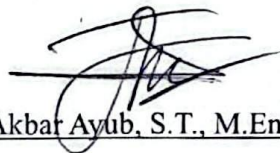
Judul Skripsi : SIMULASI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DAN EMISI
MESIN DIESEL DUAL-FUEL BERBAHAN BAKAR
CAMPURAN HIDROGEN-METANA

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jakarta.



Fathin Muhammad Mahdhudhu, S.T., M.Sc.

Ketua Penguji



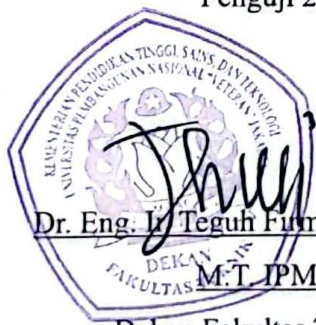
Fakhri Akbar Ayub, S.T., M.Eng., Ph.D.

Penguji 2



Dr. Ir. Fajri Ashfi Rayhan, S.T., M.T.

Penguji 1



Dr. Eng. Ir. Teguh Fumansyah, S.T.,

M.T. JPM

Dekan Fakultas Teknik



Dr. Wiwin Sulistyawati, S.T., M.T.

Kepala Program Studi

Ditetapkan di: Jakarta

Tanggal Ujian: 13 Juli 2026

HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING

SIMULASI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DAN EMISI MESIN DIESEL *DUAL-FUEL* BERBAHAN BAKAR CAMPURAN HIDROGEN-METANA

Disusun Oleh:

Dyas Isnaen Ilham

2210313062

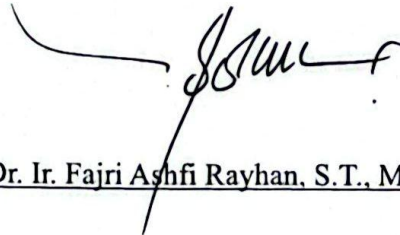
Menyetujui,

Pembimbing 1



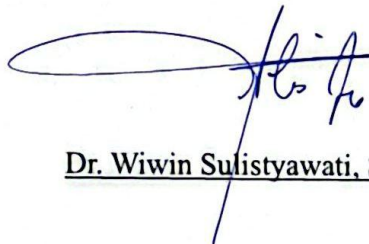
Fathin Muhammad Mahdhudhu,
S.T., M.Sc.

Pembimbing 2



Dr. Ir. Fajri Ashfi Rayhan, S.T., M.T.

Kepala Program Studi S1 Teknik Perkapalan



Dr. Wiwin Sulistyawati, S.T., M.T.

PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya sendiri dan semua sumber yang dikutip untuk dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Dyas Isnaen Ilham

NIM : 2210313062

Program Studi : S1 Teknik Perkapalan

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia dituntut dan diproses sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Jakarta, 13 Juli 2026

Yang menyatakan,



Dyas Isnaen Ilham

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai civitas akademik Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jakarta, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Dyas Isnaen Ilham

NIM : 2210313062

Program Studi : S1 Teknik Perkapalan

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jakarta Hak Bebas Royalti Non Eksklusif (*Non-Exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

”SIMULASI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DAN EMISI MESIN DIESEL *DUAL-FUEL* BERBAHAN BAKAR CAMPURAN HIDROGEN-METANA”

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti ini, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jakarta berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Jakarta

Pada tanggal: 13 Juli 2026

Yang menyatakan,



Dyas Isnaen Ilham

SIMULASI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DAN EMISI MESIN DIESEL *DUAL-FUEL* BERBAHAN BAKAR CAMPURAN HIDROGEN-METANA

Dyas Isnaen Ilham

ABSTRAK

Mesin diesel kelautan bersistem penyalaan kompresi masih menjadi kontributor utama jejak emisi gas buang pada sektor maritim, sehingga teknologi *dual-fuel* hidrogen-metana terus menjadi perhatian sebagai jalur menuju propulsi rendah karbon. Penelitian ini menggunakan simulasi CFD pada perangkat lunak ANSYS Forte *Student* untuk mengkarakterisasi perilaku pembakaran di dalam silinder serta pembentukan polutan pada mesin diesel *dual-fuel* berbasis platform FAW CA6DL2-35. 4 konfigurasi injeksi diuji melalui kombinasi dua waktu mulai injeksi (-35° dan -30° CA bTDC) dengan dua durasi injeksi ($10,5^\circ$ dan $12,5^\circ$ CA), yang masing-masing diterapkan pada tiga tingkat substitusi bahan bakar: hidrogen murni, campuran seimbang H_2-CH_4 , dan metana murni. Pada seluruh konfigurasi, hidrogen secara konsisten mendorong proses pembakaran menuju tekanan, temperatur, dan laju pelepasan panas puncak yang lebih tinggi, namun disertai peningkatan emisi NO_x ; metana menunjukkan pola sebaliknya, dengan respons termal paling ringan namun kadar CO dan UHC tertinggi. Campuran 50:50 terbukti lebih efektif meredam *trade-off* tersebut dibandingkan kedua bahan bakar tunggal, menghasilkan profil emisi paling seimbang di antara ketiga rasio yang diuji. Dari sembilan skenario injeksi, konfigurasi A3 — waktu mulai injeksi -35° CA bTDC dengan durasi injeksi $10,5^\circ$ CA, dipadukan dengan campuran 50:50 — menghasilkan keseimbangan terbaik, dengan tekanan puncak sebesar 14,03 MPa, temperatur puncak 2.024,33 K, dan laju pelepasan panas puncak 1.363,10 J/°CA, sekaligus mempertahankan emisi CO dan UHC pada level terendah di antara seluruh skenario bahan bakar campuran (masing-masing 447,31 ppm dan 79,84 ppm) dengan emisi NO_x moderat sebesar 1.503,01 ppm.

Kata kunci: *dual-fuel*, hidrogen, metana, emisi gas buang, karakteristik pembakaran.

SIMULATION OF COMBUSTION AND EMISSION CHARACTERISTICS OF HYDROGEN-METHANE BLENDED DUAL-FUEL DIESEL ENGINES

Dyas Isnaen Ilham

ABSTRACT

Compression-ignition marine engines remain the primary contributor to the maritime sector's exhaust footprint, prompting continued interest in hydrogen–methane dual-fuel operation as a pathway toward lower-carbon propulsion. This study employs CFD simulation in ANSYS Forte Student to characterize the in-cylinder combustion behavior and pollutant formation of a dual-fuel diesel engine based on the FAW CA6DL2-35 platform. Four injection configurations were examined by combining two start-of-injection timings (-35° and -30° CA bTDC) with two injection durations (10.5° and 12.5° CA), each tested across three fuel substitution levels: pure H_2 , an equal H_2 – CH_4 blend, and pure CH_4 . Across all configurations, hydrogen consistently drove the combustion process toward higher peak pressure, temperature, and heat release rate, but at the cost of elevated NO_x output; methane produced the opposite pattern, with the mildest thermal response paired with the highest CO and UHC levels. The 50:50 blend was found to moderate this trade-off more effectively than either single fuel, offering the most balanced emission profile among the three ratios tested. Among the nine injection scenarios, configuration A3 — start of injection at -35° CA bTDC with a 10.5° CA injection duration, paired with the 50:50 blend — yielded the best overall balance, producing a peak pressure of 14.03 MPa, peak temperature of 2,024.33 K, and peak heat release rate of 1,363.10 J/°CA, while keeping CO and UHC emissions at their lowest levels among all blended-fuel scenarios (447.31 ppm and 79.84 ppm, respectively) with a moderate NO_x output of 1,503.01 ppm.

Keywords: dual-fuel engine, hydrogen, methane, exhaust emissions, combustion characteristics.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur senantiasa penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat serta karunia-Nya. Berkat ridho-Nya, penulis dapat merampungkan penyusunan skripsi ini sebagai salah satu syarat akademis untuk meraih gelar Sarjana Teknik “Veteran” Jakarta.

Skripsi yang mengusung judul “SIMULASI KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DAN EMISI MESIN DIESEL *DUAL-FUEL* BERBAHAN BAKAR CAMPURAN HIDROGEN-METANA” ini merupakan wujud nyata dari perjalanan panjang penulis dalam menempuh pendidikan serta mengeksplorasi berbagai kajian literatur. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa keberhasilan penyusunan naskah ini tidak akan terwujud tanpa adanya bimbingan, arahan serta dukungan tanpa henti dari berbagai pihak sejak awal perkuliahan.

Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan kerendahan hati, penulis ingin mengucapkan ucapan terima kasih yang tulus kepada:

1. Ibu Dr. Wiwin Sulistyawati, S.T., M.T., selaku Kepala Program Studi Teknik Perkapalan Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jakarta, yang telah senantiasa memfasilitasi dan mendukung perjalanan akademik penulis.
2. Bapak Fathin Muhammad Mahdhudhu, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing, atas segala dedikasi waktu, tenaga, dan pikiran dalam bimbingan, arahan, serta evaluasi yang sangat berharga hingga skripsi ini terselesaikan dengan baik.
3. Segenap jajaran dosen beserta staf tenaga kependidikan di lingkungan Program Studi Teknik Perkapalan, atas transfer ilmu pengetahuan dan bantuan yang diberikan selama masa studi.
4. Bapak Ambar Mahbudi Tranawa, ayah penulis yang senantiasa menjadi sosok figur yang tak pernah lelah mendidik dan membimbing sejak kecil. Untaian doa, nasihat, dan kasih sayangnya selalu menjadi penyemangat dalam setiap langkah penulis.

5. Ibu Maymunah Hidayat, ibu penulis yang senantiasa menjadi sumber inspirasi dan kekuatan. Kasih sayang yang tulus serta pengorbanan tanpa batas dari beliau adalah motivasi terbesar penulis dalam menuntaskan tanggung jawab ini.
6. Bang Daffa Nurpradana dan adik Diara Putri Nuralfalah, atas cinta, semangat, serta bantuan moral maupun materiil yang selalu menguatkan perjalanan penulis.
7. Sahabat YS, yang selalu bersedia meluangkan waktu untuk memberikan dukungan moral dan doa selama proses pengerjaan skripsi ini berlangsung.
8. Maritim 2022, yang senantiasa hadir dalam suka dan duka, saling bertukar wawasan, dan memberikan warna tersendiri selama menghadapi dinamika dunia perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa di dalam skripsi ini masih terdapat berbagai kekurangan, baik dari segi penyusunan kalimat maupun kedalaman materi. Maka dari itu, segala bentuk kritik maupun saran yang konstruktif sangat penulis harapkan demi penyempurnaan karya ini di masa yang akan datang.

Akhirulkalimat, Alhamdulillahirabbil'alamin, segala puji bagi Allah Tuhan semesta alam. Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan pihak-pihak yang telah membantu. Penulis berharap karya sederhana ini dapat memperkaya khazanah keilmuan, memberikan manfaat luas, serta menjadi referensi yang berguna khususnya di bidang Teknik Perkapalan.

Jakarta, Juli 2026

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING.....	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iv
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 <i>Literature Review</i>	7
2.2 <i>State of the Art</i>	9
2.3 Mesin Diesel	10
2.3.1 Pengertian Mesin Diesel	10
2.3.2 Prinsip Mesin Diesel 4 Langkah	11
2.4 <i>Dual-fuel Injection</i>	11
2.5 Bahan Bakar	12
2.5.1 Diesel	12
2.5.2 Hidrogen.....	12
2.5.3 Metana.....	13
2.6 <i>In-cylinder Pressure</i>	13

2.7 <i>In-cylinder Temperature</i>	14
2.8 <i>Heat Release Rate</i>	15
2.9 Emisi Gas Buang.....	17
2.9.1 CO	19
2.9.2 NO _x	19
2.9.3 UHC	20
2.10 ANSYS Forte <i>Student</i>	20
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	22
3.2 Spesifikasi Mesin	23
3.3 <i>Fuel Properties</i>	23
3.3.1 <i>Bahan Bakar Diesel</i>	23
3.3.2 <i>Bahan Bakar Hidrogen-Metana</i>	24
3.4 <i>Sector Mesh Generator</i>	25
3.5 <i>Models</i>	27
3.5.1 <i>Chemistry</i>	27
3.5.2 <i>Turbulence</i>	27
3.5.3 <i>Injector Setup</i>	27
3.6 <i>Boundary Condition</i>	28
3.7 <i>Initial Condition</i>	28
3.8 <i>Simulation Controls</i>	28
3.9 <i>Run Simulation</i>	29
3.10 Variasi.....	29
3.11 Variabel Penelitian.....	30
3.11.1 Variabel Bebas	30
3.11.2 Variabel Terikat	30
3.11.3 Variabel Kontrol	31
3.12 <i>Grid Independence</i>	31
3.13 <i>Mesh Convergence</i>	32
3.14 Validasi	33
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Karakteristik Pembakaran dan Emisi pada Variasi Kondisi Operasional ...	35
4.2 Karakteristik Pembakaran Akibat Variasi Parameter Injeksi dan Substitusi Bahan Bakar	39

4.2.1 Karakteristik Pembakaran pada SOI -35 dan Durasi Injeksi 12,5	39
4.2.2 Karakteristik Pembakaran pada SOI -30 dan Durasi Injeksi 12,5	40
4.2.3 Karakteristik Pembakaran pada SOI -35 dan Durasi Injeksi 10,5	42
4.2.4 Karakteristik Pembakaran pada SOI -30 dan Durasi Injeksi 10,5	43
4.3 Karakteristik Emisi Gas Buang Akibat Variasi Parameter Injeksi dan Substitusi Bahan Bakar	45
4.3.1 Emisi pada Durasi Injeksi 12,5	45
4.3.2 Emisi pada Durasi Injeksi 10,5	47
4.4 Visualisasi Kontur Ruang Bakar dan Distribusi Partikel Injeksi	49
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	53
5.1 Kesimpulan	53
5.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA	
RIWAYAT HIDUP	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tabel <i>Literature Review</i>	7
Tabel 2. 2 Tabel <i>State of the Art</i>	10
Tabel 3. 1 Spesifikasi Mesin.....	23
Tabel 3. 2 Properti Diesel dan <i>Surrogated Diesel</i>	24
Tabel 3. 3 Properti Hidrogen-Metana	24
Tabel 3. 4 Spesifikasi pada <i>Engine Parameter</i>	25
Tabel 3. 5 Spesifikasi <i>Solid Cone Injector</i>	27
Tabel 3. 6 Spesifikasi <i>Boundary Condition</i>	28
Tabel 3. 7 Spesifikasi <i>Initial Condition</i>	28
Tabel 3. 8 Spesifikasi <i>Simulation Controls</i>	29
Tabel 3. 9 Tabel Variasi dan Responnya	30
Tabel 3. 10 Hasil dari <i>Grid Independency</i> pada <i>Mesh 2.352</i>	31
Tabel 3. 11 Hasil dari <i>Grid Independency</i> pada <i>Mesh 6.222</i>	31
Tabel 3. 12 Hasil dari <i>Grid Independency</i> pada <i>Mesh 10.585</i>	32
Tabel 3. 13 Hasil Deviasi Variasi Jumlah Sel terhadap <i>Max Pressure</i>	32

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Tren Emisi Karbon dioksida (CO ₂) Global Berdasarkan Jenis Kapal Utama Periode 2012-2023.....	1
Gambar 2. 1 Proses Kerja Mesin 4 Langkah	11
Gambar 2. 2 Ilustrasi <i>Dual-fuel Injection</i>	12
Gambar 2. 3 Grafik Tekanan terhadap <i>Crank Angle After Intake</i> (TDC).....	14
Gambar 2. 4 Grafik Temperatur terhadap <i>Crank Angle Degree</i>	15
Gambar 2. 5 Grafik <i>Heat Release Rate</i> terhadap <i>Crank Angle Degree</i>	17
Gambar 2. 6 Grafik Donut dari Persentase Total Emisi	19
Gambar 3. 1 Diagram Alur Penelitian	22
Gambar 3. 2 Model 3D Mesin Diesel pada Sector Angle 45°	26
Gambar 3. 3 Perbandingan <i>In-cylinder Pressure</i> Simulasi dan Jurnal Referensi	33
Gambar 3. 4 Perbandingan <i>In-cylinder Temperature</i> Simulasi dan Jurnal Referensi	34
Gambar 4. 1 Grafik <i>Pressure, Temperature, dan Heat Release Rate</i>	36
Gambar 4. 2 Grafik Emisi NO _x , UHC dan CO	37
Gambar 4. 3 Grafik <i>Pressure, Temperature, dan Heat Release Rate</i> (SOI -35) ..	39
Gambar 4. 4 Grafik <i>Pressure, Temperature, dan Heat Release Rate</i> (SOI -30) ..	40
Gambar 4. 5 Grafik <i>Pressure, Temperature, dan Heat Release Rate</i> (SOI -35) ..	42
Gambar 4. 6 Grafik <i>Pressure, Temperature, dan Heat Release Rate</i> (SOI -30) ..	43
Gambar 4. 7 Grafik Emisi pada Durasi Injeksi 12,5	45
Gambar 4. 8 Grafik Emisi pada Durasi Injeksi 10,5	47
Gambar 4. 9 Gambar Visualisasi Kontur Temperatur pada Bahan Bakar Campuran (<i>Mix</i>).....	49
Gambar 4. 10 Gambar Visualisasi Kontur Temperatur pada Distribusi <i>Spray Droplet</i> Pilot Diesel.....	51

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Lembar Konsultasi Pembimbing 1 (Bagian 1)

Lampiran 2 Lembar Konsultasi Pembimbing 1 (Bagian 2)

Lampiran 3 Lembar Konsultasi Pembimbing 2