

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR NOTASI	xi
INTISARI	xiii
ABSTRACT	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Asumsi dan Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Co-firing Pada Internal Combustion Engine	6
2.2 Keaslian Penelitian	12
BAB III LANDASAN TEORI	16
3.1 Mesin Diesel Gas Tipe 18V50DF	16
3.1.1 Prinsip Kerja Sistem <i>Dual fuel</i>	17
3.1.2 Komponen Utama Mesin Diesel Gas	18
3.2 Bahan Bakar PLTDG	22
3.2.1 <i>Liquefied Natural Gas</i> (LNG)	22
3.2.2 <i>High-Speed Diesel</i> (HSD)	22
3.2.3 Hidrogen (H ₂)	23
3.2.4 Stoikiometri Pembakaran	24
3.3 Teori Pembakaran	26
3.3.1 Mekanisme Reaksi Kimia Pembakaran	26
3.3.2 Struktur Api: <i>Premixed Flame</i> dan <i>Diffusion Flame</i>	27
3.4 Co-firing	28

3.5	Termodinamika dan Karakteristik Pembakaran	29
3.5.1	Tahapan Pembakaran dalam Mesin Gas	33
3.5.2	Parameter Pembakaran	35
3.5.3	<i>Lean-Burn</i> dan Pengaruhnya terhadap Kinerja	35
3.5.4	<i>Gross Indicated Work</i> dan <i>Indicated Efficiency</i>	36
3.5.5	Mekanisme Pembentukan Emisi	37
3.6	Computational Fluid Dynamics (CFD)- ANSYS Forte	40
3.6.1	Prinsip Dasar CFD – ANSYS FORTE	41
3.6.2	Persamaan Dasar (<i>Governing Equations</i>)	42
3.6.3	Metode Diskritisasi	43
3.6.4	Formulasi <i>Solver</i>	43
3.6.5	Model Turbulensi	44
3.6.6	Model Pembakaran	45
3.6.7	Interaksi Turbulensi–Kimia	47
3.6.8	Model Pembentukan Emisi	47
3.6.9	Algoritma Komputasi	48
3.6.10	Konvergensi Simulasi	49
BAB IV	METODE PENELITIAN	51
4.1	Alat Penelitian	51
4.2	Objek Penelitian	52
4.2.1	Dimensi Model	52
4.2.2	Data Bahan Bakar Dan Komposisi Udara	52
4.2.3	Data Thermal Boundary Condition	53
4.3	Diagram Alir Penelitian	54
4.4	Tahapan Penelitian	55
4.4.1	Studi Pustaka dan Pengumpulan Data Teknis	55
4.4.2	Pemodelan Geometri dan <i>Meshing</i>	55
4.4.3	Setup Model dan Boundary Condition	55
4.4.4	Simulasi komputasi pada kondisi Baseline	55
4.4.5	<i>Mesh</i> Independence Test	56
4.4.6	Validasi Hasil Simulasi	56
4.4.7	Analisis dan Pembahasan	57
4.5	Pemodelan Geometri	57
4.6	Variabel Penelitian	58

4.6.1 Variabel Tetap	58
4.6.2 Variabel Bebas	59
4.6.3 Variabel Terikat	59
4.6.3 Variasi Penelitian	59
4.7 Prosedur Pembuatan Model <i>CFD</i>	60
4.7.1 Pembuatan Model Dengan <i>Sector Mesh</i>	62
4.7.2 Set-Up model dan Boundary Conditions	62
4.7.3 Pengaturan Model Fisis dan <i>Solver</i>	63
4.7.4 Output dan Run Simulation	65
4.7.5 Post Processing	66
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	67
5.1 <i>Mesh Independence</i> Test dan Kestabilan Numerik	69
5.1.1 <i>Mesh Independence Test</i>	69
5.1.2 Kestabilan Numerik	70
5.2 Validasi Model	72
5.3 Pengaruh Komposisi Hidrogen Pada Parameter Pembakaran	73
5.3.1 Pengaruh Komposisi Hidrogen pada <i>Peak Cylinder Pressure</i> .	74
5.3.2 Pengaruh Komposisi Hidrogen Pada Temperatur Silinder Dan <i>Exhaust Gas Temperature</i>	82
5.4 Pengaruh Komposisi Hidrogen Pada <i>Engine Performance</i>	88
5.4.1 Pengaruh Komposisi Hidrogen Pada <i>Gross Indicated Work</i>	88
5.4.2 Pengaruh Komposisi Hidrogen Pada <i>Thermal Efficiency</i>	91
5.5 Pengaruh <i>Equivalence Ratio</i> Pada Emisi Gas Buang	93
5.6 Evaluasi Penentuan Parameter Optimum Operasi <i>Engine</i>	99
BAB VI PENUTUP	101
6.1 Kesimpulan	101
6.2 Saran	102

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mesh Independence Study	6
Gambar 2.2 Validasi model simulasi dengan data eksperimen	7
Gambar 2.3 Tekanan silinder pada fraksi mol hidrogen	8
Gambar 2.4 (a) Variasi nilai emisi CO, (b) variasi nilai emisi CO ₂ , (c) variasi nilai emisi THC, (d) variasi nilai emisi NO _x , (e) variasi nilai emisi asap, dan (f) variasi nilai temperatur gas buang berdasarkan kecepatan mesin pada berbagai kadar hidrogen.	8
Gambar 2.5 Brake Thermal Efficiency (BTE) pada Variasi AFR dan rasio komposisi H ₂	9
Gambar 2.6 Grafik BTE pada komposisi HCNG	10
Gambar 2.7 Perubahan Tekanan Silinder terhadap Variasi AFR	11
Gambar 3. 1 Mesin Wärtsilä 18V50DF	16
Gambar 3. 2 Skema Pembakaran Dual Fuel 18V50DF	18
Gambar 3. 3Sistem Ruang Bakar Mesin Wärtsilä 50DF	20
Gambar 3. 4 Skema Co-Firing Hidrogen	29
Gambar 3. 5 Diagram Siklus Otto 4 Stroke	31
Gambar 3. 6 P-V Dan T-S Diagram Siklus Otto	31
Gambar 3. 7 Siklus Diesel	32
Gambar 3. 8 Kurva Tahapan Pembakaran SI Engine	34
Gambar 3. 9 AFR Pada Mesin Diesel	36
Gambar 3. 10 Pembentukan NO _x Pada Variasi (λ)	38
Gambar 4. 1 Diagram Alur Penelitian	54
Gambar 4. 2 Perbandingan Mesh pada ukuran Cell yang berbeda	56
Gambar 4. 3 Parameter Mesh	58
Gambar 4. 4 Diagram Alur Simulasi	61
Gambar 4. 5 Pengaturan Spesies Reaksi	65
Gambar 4. 6 Run Simulation	66
Gambar 5. 1 Grafik Kegagalan Konvergensi selama simulasi berlangsung	68
Gambar 5. 2 Grafik kegagalan konvergensi	70
Gambar 5. 3 Grafik <i>cylinder Pressure</i> Simulasi vs Experiment.	73

Gambar 5.4 Grafik Tekanan vs <i>Crank Angle</i> pada variasi <i>Equivalence Ratio</i> dan komposisi Hidrogen.	76
Gambar 5.5 Grafik <i>Max Peak Pressure</i> Pada Tiap <i>Equivalence Ratio</i> Dan Komposisi Hidrogen.	76
Gambar 5.6 Grafik Temperatur vs <i>Crank Angle</i> pada variasi <i>Equivalence Ratio</i> dan komposisi Hidrogen.	84
Gambar 5.7 Grafik Maximum Temperatur Pada Variasi <i>Equivalence Ratio</i> Dan Komposisi Hidrogen	85
Gambar 5.8 <i>Exhaust Gas Temperature</i> Pada Variasi <i>Equivalence Ratio</i> Dan Komposisi Hidrogen	88
Gambar 5.9 <i>Gross Indicated Work</i> pada Tiap variasi <i>Equivalence Ratio</i> dan Komposisi Hidrogen	89
Gambar 5.10 <i>Thermal Efficiency</i> pada Tiap variasi <i>Equivalence Ratio</i> dan Komposisi Hidrogen	92

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perkembangan Penelitian Terkait <i>Co-firing</i> Hidrogen	12
Tabel 3. 1 Perbandingan LNG, HSD dan H ₂	24
Tabel 4. 1 Spesifikasi Peralatan Komputasi	51
Tabel 4. 2 Data Spesifikasi Diesel Wartsila 18V50DF	52
Tabel 4. 3 Data bahan Bakar LNG	53
Tabel 4. 4 Data Spesifikasi Pilot Fuel	53
Tabel 4. 5 Komposisi Udara	53
Tabel 4. 6 Parameter Baseline	56
Tabel 4. 7 Parameter Validasi	57
Tabel 4. 8 Variasi Pengambilan Data	60
Tabel 4. 9 Geometri Model	62
Tabel 4. 10 Parameter Model	62
Tabel 4. 11 Parameter Boundary Conditions	63
Tabel 4. 12 Nilai Koefisien Turbulen	63
Tabel 4. 13 Parameter Model Pembakaran	64
Tabel 4. 14 Parameter Chemistry Solver	64
Tabel 5. 1 Perhitungan massa LNG dalam simulasi	68
Tabel 5. 2 Massa total tiap perubahan <i>equivalence ratio</i>	69
Tabel 5. 3 Hasil <i>Mesh Independence Test</i>	70
Tabel 5. 4 Mass Balance	72
Tabel 5. 5 Konservasi <i>Species</i>	72
Tabel 5. 6 Data <i>Max Peak Pressure</i> dan Emisi gas buang	73
Tabel 5. 7 Autoignition, dan Durasi Pembakaran Tiap Variasi Equivalence Ratio	79
Tabel 5. 8 Kondisi Pembakaran silinder pada 5 CA.	81
Tabel 5. 9 <i>Pressure</i> Pembakaran silinder pada 5 CA.	82
Tabel 5. 10 Emisi Gas Buang Tiap Variasi Equivalence Ratio Dan Komposisi H ₂	94
Tabel 5. 11 Emisi CO pada tiap variasi Equivalence Ratio dan komposisi H ₂	97
Tabel 5. 12 Emisi NO pada tiap variasi Equivalence Ratio dan komposisi H ₂	98

DAFTAR NOTASI

Simbol	Keterangan	Satuan
A	Luas permukaan	m^2
A_l	Luas permukaan cylinder liner	m^2
A_h	Luas permukaan cylinder head	m^2
BC	Boundary condition	—
cp	Panas jenis pada tekanan konstan	$J/kg \cdot K$
cv	Panas jenis pada volume konstan	$J/kg \cdot K$
CR	Compression ratio	—
D	Diameter geometri / fitur ruang bakar	m
f	Isothermal parameter (wall function)	—
H	Koefisien perpindahan panas konveksi	$W/m^2 \cdot K$
HRR	Heat release rate	$J/^{\circ}CA$ atau W
IC	Initial condition	—
K	Konduktivitas termal fluida	$W/m \cdot K$
ks	Konduktivitas termal padatan	$W/m \cdot K$
LHV	Nilai kalor rendah (Lower heating value)	MJ/kg
$\dot{m}$	Laju alir massa	kg/s
$Niter$	Jumlah iterasi	—
p	Tekanan	Pa
q_w	Heat flux pada dinding	W/m^2
q_n	Heat flux normal ke dinding	W/m^2
Re	Bilangan Reynolds	—

Simbol	Keterangan	Satuan
SL	Laminar flame speed	m/s
ST	Turbulent flame speed	m/s
T	Temperatur gas	K
T_w	Temperatur dinding	K
u, v, w	Komponen kecepatan fluida	m/s
U	Kecepatan rata-rata	m/s
u^*	Friction velocity	m/s
V	Volume ruang bakar	m ³
X_{H_2}	Fraksi mol hidrogen	—
X_{CH_4}	Fraksi mol metana	—
Y_i	Fraksi massa spesies ke- i	—
Δt	Waktu per langkah (time step)	S
∇T	Gradien temperatur	K/m
$\nabla \cdot (k \nabla T)$	Difusi panas	W/m ³