



**ANALISIS TERMODINAMIKA PADA SIKLUS *BRAYTON*
SUPERKRITIS DENGAN FLUIDA KERJA CO_2 , C_2H_6 DAN N_2O
UNTUK PEMULIHAN LIMBAH PANAS DARI *MARINE LOW-
SPEED DIESEL ENGINE***

SKRIPSI

YUSILIANA PRATIWI

2110313024

UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL VETERAN JAKARTA

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK PERKAPALAN

2025



**ANALISIS TERMODINAMIKA PADA SIKLUS *BRAYTON*
SUPERKRITIS DENGAN FLUIDA KERJA CO_2 , C_2H_6 DAN N_2O
UNTUK PEMULIHAN LIMBAH PANAS DARI *MARINE LOW-
SPEED DIESEL ENGINE***

SKRIPSI

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

YUSILIANA PRATIWI

2110313024

UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL VETERAN JAKARTA

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK PERKAPALAN

2025

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Yusiliana Pratiwi

NIM : 2110313024

Program Studi : S1 Teknik Perkapalan

Judul Skripsi : Analisis Termodinamika Pada Siklus *Brayton* Superkritis Dengan Fluida Kerja CO_2 , C_2H_6 , dan N_2O Untuk Pemulihan Limbah Panas Dari *Marine Low-Speed Diesel Engine*.

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.



Purwo Joko Suranto, ST. MT

Penguji Utama



Fathin M. Mahdhudhu, ST., B.Eng, M.sc

Penguji Lembaga



Dr. Muchamad Oktaviandri, ST., MT.,

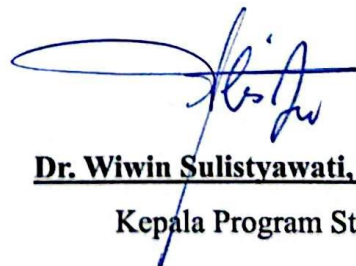
IPM., ASEAN.Eng

Dekan Fakultas Teknik



Fakhri Akbar Ayub, ST. M.Eng. Ph.D

Penguji I (Pembimbing)



Dr. Wiwin Sulistyawati, ST., MT.

Kepala Program Studi

Ditetapkan di : Depok

Tanggal Ujian : 10 Januari 2025

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

ANALISIS TERMODINAMIKA PADA SIKLUS *BRAYTON* SUPERKRITIS
DENGAN FLUIDA KERJA CO_2 , C_2H_6 DAN N_2O UNTUK PEMULIHAN
LIMBAH PANAS DARI *MARINE LOW-SPEED DIESEL ENGINE*

Disusun Oleh:

Yusiliana Pratiwi


2110313024



Menyetujui,

Pembimbing I

Pembimbing II

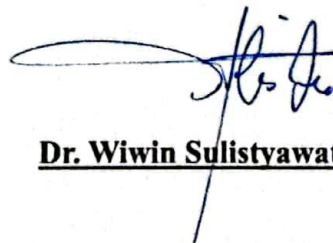


Dr. Ir. Fajri Ashfi Rayhan, S.T., M.T.



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

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 atau dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Yusiliana Pratiwi

NIM : 2110313024

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.

Depok, 10 Januari 2025

Yang menyatakan,



Yusiliana Pratiwi

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Yusiliana Pratiwi

NIM : 2110313024

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:

**ANALISIS TERMODINAMIKA PADA SIKLUS *BRAYTON* SUPERKRITIS
DENGAN FLUIDA KERJA CO_2 , (C_2H_6) DAN N_2O UNTUK PEMULIHAN
LIMBAH PANAS DARI *MARINE LOW-SPEED DIESEL ENGINE***

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 : Depok

Pada Tanggal : 10 Januari 2025

Yang menyatakan,



Yusiliana Pratiwi

**ANALISIS TERMODINAMIKA PADA SIKLUS *BRAYTON*
SUPERKRITIS DENGAN FLUIDA KERJA CO₂, C₂H₆ DAN N₂O
UNTUK PEMULIHAN LIMBAH PANAS DARI *MARINE LOW-
SPEED DIESEL ENGINE***

Yusiliana Pratiwi

ABSTRAK

Supercritical Brayton Cycle (SBS) merupakan sistem yang digunakan untuk menghasilkan daya listrik dengan cara memanfaatkan panas dari gas buang *marine low-speed diesel engine* dengan kinerja dan efisiensi yang baik. Teknologi SBS diprediksi dapat mengurangi gas buang panas yang dihasilkan dari gas buang mesin diesel seperti NO_x, SO_x, CO, dan CO₂. Penelitian ini berfokus pada 2 objek, yaitu energi yang dihasilkan oleh masing-masing komponen mesin dan efisiensi termal. Pada penelitian ini menggunakan 3 variasi meliputi variasi fluida kerja, temperatur, dan tekanan. Untuk variasi fluida kerja yaitu menggunakan CO₂, C₂H₆, dan N₂O. Sedangkan untuk temperatur dan tekanan memiliki 5 variasi yang berbeda. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa kerja turbin, kerja kompresor, dan kalor masuk terbesar didapatkan dari fluida kerja C₂H₆ yaitu sebesar 506,6 kJ/kg, 124,66 kJ/kg, dan 716,78 kJ/kg. Pada analisis efisiensi termal, ditemukan bahwa fluida kerja N₂O lebih unggul dengan rata-rata efisiensi termal sebesar 60%, sedangkan fluida kerja CO₂ sebesar 59% dan fluida kerja C₂H₆ sebesar 58%. Kemudian analisis *energy losses* membuktikan meskipun fluida kerja C₂H₆ memiliki nilai tertinggi pada kerja turbin, kerja kompresor dan kalor masuk, jika dibandingkan dengan CO₂ dan N₂O nilai *energy losses* yang dihasilkan C₂H₆ juga besar, yaitu 258,93 kJ/kg pada semua kondisi. Demikian penelitian ini dapat mengkaji efek teknologi SBS dengan variasi fluida kerja, temperatur, dan tekanan pada pemanfaatan panas gas buang *marine low-speed diesel engine*. Diharapkan penelitian ini dapat mendukung pengembangan teknologi alternatif untuk mengurangi pencemaran lingkungan.

Kata kunci: siklus *brayton*, gas buang, kerja turbin, efisiensi.

***THERMODYNAMIC ANALYSIS ON SUPERCRITICAL
BRAYTON CYCLE WITH CO₂, C₂H₆ AND N₂O WORKING
FLUIDS FOR WASTE HEAT RECOVERY FROM MARINE LOW-
SPEED DIESEL ENGINE***

Yusiliana Pratiwi

ABSTRACT

The Supercritical Brayton Cycle (SBS) is a system used to generate electricity by utilizing heat from the exhaust gases of marine low-speed diesel engines, offering high performance and efficiency. SBS technology is expected to reduce emissions such as NO_x, SO_x, CO, and CO₂ from diesel engine exhaust. This study focuses on two objectives: the energy generated by each engine component and thermal efficiency. The research examines three variations: working fluid, temperature, and pressure. The working fluids used are CO₂, C₂H₆, and N₂O. While temperature and pressure include five variations each. Results show that C₂H₆ produces the highest turbine work, compressor work, and heat input, amounting to 506.6 kJ/kg, 124.66 kJ/kg, and 716.78 kJ/kg, respectively. Thermal efficiency analysis reveals N₂O as the most efficient working fluid, with an average efficiency of 60%, compared to 59% for CO₂ and 58% for C₂H₆. However, energy loss analysis indicates that although C₂H₆ achieves the highest turbine and compressor work and heat input, it also incurs the highest energy losses at 258.93 kJ/kg under all conditions. This study evaluates SBS technology's effects with variations in working fluid, temperature, and pressure on waste heat utilization in marine diesel engines. The findings aim to support alternative technology development for reducing environmental pollution.

Keywords: *brayton cycle, exhaust gas, turbine work, efficiency*

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, serta shalawat dan salam penulis lantunkan kepada Nabi Muhammad Salallahu'alaihi Wasallam. Atas berkat rahmat-Nya lah penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “Analisis Termodinamika Pada Siklus *Brayton* Superkritis Dengan Fluida Kerja CO₂, C₂H₆, dan N₂O Untuk Pemulihan Limbah Panas Dari *Marine Low-Speed Diesel Engine*” yang mana Skripsi ini merupakan persyaratan kelulusan dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik Program Studi S1 Teknik Perkapalan Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta. Penulis juga menyampaikan rasa syukur dan mengucapkan terima kasih serta penghargaan yang tak terhingga kepada:

1. Allah Subhanahu Wa Ta'ala yang senantiasa melimpahkan nikmat serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi.
2. Ibu Dr. Wiwin Sulistyawati, S.T., M.T. selaku Kepala Program Studi Teknik Perkapalan Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta.
3. Bapak Dr. Ir. Fajri Ashfi Rayhan, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing I yang telah membantu dan mengarahkan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
4. Bapak Fakhri Akbar Ayub, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku pembimbing II yang telah membantu memberikan pengarahan kepada penulis.
5. Ibunda Lilik Utami dan Ayahanda Andre Suryana selaku orang tua yang selalu menyertai penulis dengan kasih sayang, cinta dan doa.
6. Luciana Pratiwi selaku kakak terkasih penulis, yang selalu memberikan dukungan serta semangat dengan kasih sayang.
7. Bagoes Pribadi selaku partner yang turut serta memberikan semangat dan menemani selama penulis menyusun skripsi.
8. Cipa, selaku sahabat terdekat penulis yang senantiasa menemani, menghibur dan memberikan semangat.
9. Tresa, Putri, dan Dhiya sebagai sahabat penulis yang turut menyertai selama Skripsi ini disusun.

10. Saudara dan Saudari Maritim 2021 yang turut serta menuntut ilmu bersama penulis.
11. Seluruh pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu, yang telah memberikan dukungan kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini terdapat banyak kekurangan baik dalam penyajian materi hingga sistematika penulisan, oleh sebab itu penulis sangat terbuka untuk kritik dan saran agar melengkapi kekurangan tersebut.

Akhir kata penulis mengucapkan Alhamdulillah, semoga Allah Subhanahu Wa Ta'ala selalu menyertai langkah penulis. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan dapat menambah wawasan berpikir serta sebagai bahan referensi dan informasi yang bermanfaat bagi pengetahuan, khususnya di bidang Teknik Perkapalan.

Jakarta, Januari 2025

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iv
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR NOTASI	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Hipotesis.....	5
1.5 Tujuan Penelitian.....	5
1.6 Manfaat Penelitian	5
1.7 Sistematika Penelitian	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 <i>Marine Low-Speed Diesel Engine</i>	7
2.2 Siklus <i>Brayton</i>	8
2.3 <i>Software</i>	12
2.3.1 <i>Engineering Equation Solver (EES)</i>	12

2.3.2	<i>Reference Fluid Properties (REFPROP)</i>	12
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		13
3.1	Diagram Alir Penelitian	13
3.2	Jenis Mesin Diesel	14
3.3	Skema Mesin <i>Supercritical Brayton Cycle (SBS)</i>	15
3.4	Variasi Penelitian.....	17
3.5	Fluida Superkritis	17
3.5.1	Variasi Fluida Kerja.....	19
3.5.2	Tekanan <i>Inlet Compressor</i>	21
3.5.3	Tekanan <i>Outlet Compressor</i>	21
3.5.4	Temperatur <i>Inlet Main Compressor (MC)</i>	21
3.5.5	Temperatur <i>Inlet Turbin</i>	22
3.6	Analisis Pendekatan <i>Software</i>	22
3.6.1	Analisis Pendekatan EES	22
3.6.2	Analisis Pendekatan REFPROP.....	24
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		28
4.1	Validasi.....	28
4.2	Kerja Turbin dan Kompresor	29
4.2.1	Turbin.....	29
4.2.2	Kompresor.....	31
4.3	Kalor Masuk.....	34
4.4	Efisiensi Termal.....	36
4.5	<i>Energy Losses</i>	37
BAB 5 PENUTUP.....		40
5.1	Kesimpulan	40
5.2	Saran.....	41

DAFTAR PUSTAKA

RIWAYAT HIDUP

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Mesin Diesel.....	14
Tabel 3.2 Parameter Pengoperasian Mesin Diesel Pada Beban 100%	15
Tabel 3.3 Parameter Kinerja Peralatan Utama.....	17
Tabel 3.4 Variasi Fluida Kerja	19
Tabel 4.1 Data Simulasi dan Data Sekunder (Yan, 2022)	28

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Skema Sistem Pembangkit Listrik Siklus Gabungan	3
Gambar 2.1 <i>Marine Low-Speed Diesel Engine</i>	7
Gambar 2.2 <i>Gas-Turbin Engine</i>	8
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	13
Gambar 3.2 Gambar Mesin Diesel Tampak Samping	14
Gambar 3.3 Skema Mesin Siklus <i>Brayton</i>	16
Gambar 3.4 <i>Phase Diagram</i>	18
Gambar 3.5 Mengubah Satuan <i>Unit</i> EES	22
Gambar 3.6 Memasukkan Data di <i>Equation Window</i>	23
Gambar 3.7 Memilih Fluida Kerja	23
Gambar 3.8 Centang Merah.....	24
Gambar 3.9 Membuka REFPROP	24
Gambar 3.10 Klik <i>Options</i>	25
Gambar 3.11 Klik <i>Units</i>	25
Gambar 3.12 Klik <i>Substance</i>	26
Gambar 3.13 Mengganti Fluida Kerja.....	26
Gambar 3.14 Pemilihan Grafik.....	27
Gambar 3.15 Menentukan Batasan Grafik	27
Gambar 4.1 Grafik Batang Data Hasil Perbandingan.....	29
Gambar 4.2 Grafik Kerja Turbin Dengan CO ₂ , C ₂ H ₆ , dan N ₂ O	30
Gambar 4.3 Kerja Kompresor Total Dengan Fluida Kerja CO ₂ , C ₂ H ₆ , dan N ₂ O	32
Gambar 4.4 Kalor Masuk Dengan Fluida Kerja CO ₂ , C ₂ H ₆ , dan N ₂ O	34
Gambar 4.5 Grafik Batang Efisiensi Termal SBS	36
Gambar 4.6 Grafik Batang <i>Energy Losses</i> SBS	38

DAFTAR NOTASI

h	=	Entalpi	[kJ/kg]
W	=	Energi	[kJ/kg]
Q	=	Kalor	[kJ/kg]
P	=	Tekanan	[Mpa]
T	=	Temperatur	[°C]
Simbol			
η	=	Efisiensi	[kJ/kg]
\dot{m}	=	Laju aliran	[kg/s]
Singkatan			
SBS	=	<i>Supercritical Brayton Cycle</i>	
CO_2	=	Karbon dioksida	
C_2H_6	=	Etana	
N_2O	=	Dinitrogen monoksida	
SBS	=	<i>Supercritical Brayton Cycle</i>	
MC	=	<i>Main Compressor</i>	
RC	=	<i>Recompressor</i>	
FGHE	=	<i>Flue Gas Heat Exchanger</i>	
HTR	=	<i>High Temperature Regenerator</i>	
LTR	=	<i>Low Temperature Regenerator</i>	
PC	=	<i>Pre-Cooler</i>	