



**PENERAPAN SIKLUS *ORGANIC RANKINE CYCLE* (ORC)
PADA TEKNOLOGI *WASTE HEAT RECOVERY POWER*
GENERATION (WHRPG) PADA INDUSTRI SEMEN DENGAN
PROSES SIMULASI TERMODINAMIKA**

SKRIPSI

FEBRYAN ANDHIKA SAPUTRA

1810311008

UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL VETERAN JAKARTA

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN

2022



**PENERAPAN SIKLUS *ORGANIC RANKINE CYCLE* (ORC)
PADA TEKNOLOGI *WASTE HEAT RECOVERY POWER
GENERATION* (WHRPG) PADA INDUSTRI SEMEN DENGAN
PROSES SIMULASI TERMODINAMIKA**

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

FEBRYAN ANDHIKA SAPUTRA

1810311008

UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL VETERAN JAKARTA

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN

2022

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi diajukan oleh :

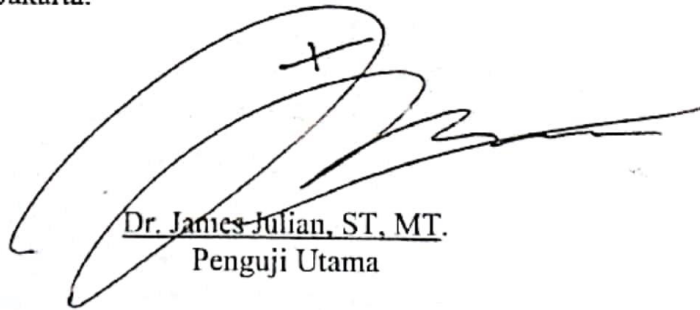
Nama : Febryan Andhika Saputra

NIM : 1810311008

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : PENERAPAN SIKLUS ORGANIC RANKINE CYCLE
(ORC) PADA TEKNOLOGI WASTE HEAT RECOVERY
POWER GENERATION (WHRPG) PADA INDUSTRI SEMEN
DENGAN PROSES SIMULASI TERMODINAMIKA

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta.



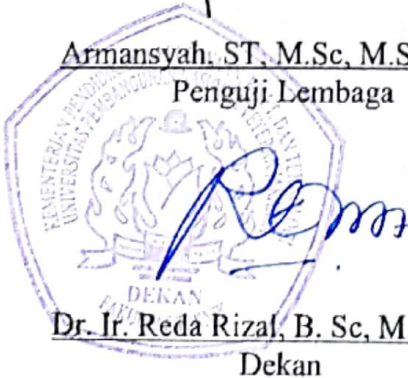
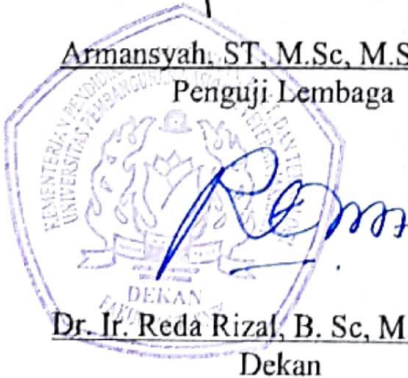
Dr. James Julian, ST, MT.
Penguji Utama



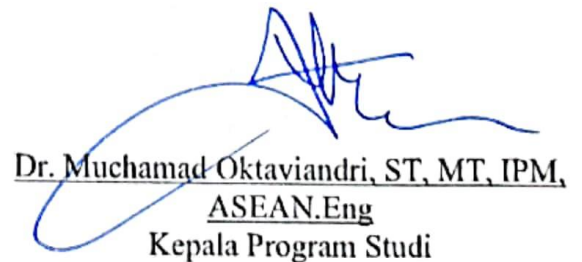
Armansyah, ST, M.Sc, M.Sc, Ph.D
Penguji Lembaga



Dr. Damora Rhakasywi, ST, MT.
Penguji/Pembimbing 1



Dr. Ir. Reda Rizal, B. Sc, M.Si, IPU
Dekan



Dr. Muchamad Oktaviandri, ST, MT, IPM,
ASEAN.Eng
Kepala Program Studi

Ditetapkan di: Jakarta

Tanggal Ujian: 24 Juni 2022

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Skripsi diajukan oleh :

Nama : Febryan Andhika Saputra

NIM : 1810311008

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : PENERAPAN SIKLUS ORGANIC RANKINE CYCLE
(ORC) PADA TEKNOLOGI WASTE HEAT RECOVERY
POWER GENERATION (WHRPG) PADA INDUSTRI SEMEN
DENGAN PROSES SIMULASI TERMODINAMIKA

Telah dikoreksi dan diperbaiki oleh penulis berdasarkan arahan dosen pembimbing.

Menyetujui,

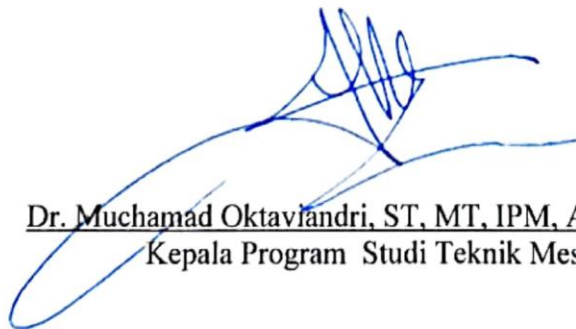


Dr. Damora Rhakasywi, ST, MT.
Pembimbing I



Fahrudin ST, MT.
Pembimbing II

Mengetahui,



Dr. Muchamad Oktaviandri, ST, MT, IPM, ASEAN.Eng
Kepala Program Studi Teknik Mesin

Ditetapkan di: Jakarta

Tanggal Ujian: 24 Juni 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Febryan Andhika Saputra

NIM : 1810311008

Program Studi : Teknik Mesin

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

Jakarta, 07 Juli 2022

Yang Menyatakan,



(Febryan Andhika Saputra)

**PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK
KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Febryan Andhika Saputra

NIM : 1810311008

Fakultas : Teknik

Program Studi : Teknik Mesin

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta Hak Bebas Royalti Non-eksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Rights*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

PENERAPAN SIKLUS *ORGANIC RANKINE CYCLE* (ORC) PADA
TEKNOLOGI *WASTE HEAT RECOVERY POWER GENERATION* (WHRPG)
PADA INDUSTRI SEMEN DENGAN PROSES SIMULASI
TERMODINAMIKA

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 mengaplikasikan 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 : 07 Juli 2022

Yang Menyatakan



(Febryan Andhika Saputra)

**PENERAPAN SIKLUS *ORGANIC RANKINE CYCLE* (ORC) PADA
TEKNOLOGI *WASTE HEAT RECOVERY POWER GENERATION*
(WHRPG) PADA INDUSTRI SEMEN DENGAN PROSES SIMULASI
TERMODINAMIKA**

Febryan Andhika Saputra

ABSTRAK

Waste Heat Recovery Power Generation (WHRPG) merupakan teknologi yang menghasilkan energi listrik dengan memanfaatkan gas panas yang terbuang dari proses produksi semen. Operasi dasar pembangkit listrik untuk menghasilkan listrik adalah siklus rankine dan siklus rankine organik (SRO) yang menggunakan zat organik, Sehingga melihat pentingnya pengaruh siklus, maka dibutuhkan penelitian lebih lanjut tentang penerapan siklus rankine organik pada Teknologi WHRPG untuk mengetahui perbandingan desain siklus dan fluida kerja terhadap kinerja sistem teknologi WHRPG. Penelitian ini dilakukan dengan proses simulasi termodinamika menggunakan *software Computer-Aided Procces Engineering* (CAPE) dengan 2 model desain yaitu Siklus Rankine dan Siklus Rankine Organik. Untuk desain WHRPG Siklus Rankine Organik Digunakan fluida kerja r-123 dan r-245fa. Dari 3 skenario simulasi yang dilakukan, daya listrik dan efisiensi termal yang dapat dihasilkan oleh masing-masing siklus dengan memanfaatkan panas yang terbuang dari proses produksi semen yaitu, Siklus rankine mengasilkan daya listrik 4,712 MW dan 17,06 % efisiensi termal, SRO fuida r-123 menghasilkan daya listrik 6,127 MW dan 18,99 % efisiensi termal, dan SRO fluida kerja r-1245fa menghasilkan 5,613 MW dan 17,36 % efisiensi termal. Sedangkan dari segi exergi pada komponen alat penukar panas pada siklus rankine memiliki efisiensi exergi yang lebih baik dari SRO, sedangkan pada komponen turbin SRO memiliki efisiensi exergi yang lebih baik dari siklus rankine dan pada komponen pompa efisiensi exergi dengan siklus rankine lebih baik dari SRO.

Kata Kunci: WHRPG, Siklus Rankine, Siklus Rankine Organik, Termodinamika

**APPLICATION OF ORGANIC RANKINE CYCLE (ORC) IN WASTE
HEAT RECOVERY POWER GENERATION (WHRPG) TECHNOLOGY
IN THE CEMENT INDUSTRY USING THERMODYNAMICS
SIMULATION PROCESS**

Febryan Andhika Saputra

ABSTRACT

Waste Heat Recovery Power Generation (WHRPG) is a technology that generates electrical energy by utilizing the waste heat gas from the cement production process. The basic operation of a power plant to generate electricity is the Rankine cycle and organic Rankine cycle (ORC) which use organic fluid. So, seeing the importance of the effect of the cycle, further research is needed on the application of the organic Rankine cycle in WHRPG Technology to compare the cycle design and working fluid to the WHRPG technology system performance. This research was conducted with a thermodynamic simulation process *using Computer-Aided Process Engineering (CAPE)* software with 2 design models, that is the Rankine Cycle and the Organic Rankine Cycle. For the WHRPG Organic Rankine Cycle design, the working fluids r-123 and r-245fa were used. From the 3 simulation scenarios, the electrical power and thermal efficiency that can be generated by each cycle by utilizing the wasted heat from the cement production process, the Rankine cycle produces 4.712 MW of electrical power and 17.06% thermal efficiency, ORC fluid r- 123 produces 6.127 MW of electrical power and 18,99 % thermal efficiency, and the working fluid ORC r-1245fa produces 5.613 MW and 17.36 % thermal efficiency. Meanwhile, in terms of exergy, the heat exchanger component in the Rankine cycle has better exergy efficiency than SRO, while the SRO turbine component has better exergy efficiency than the Rankine cycle and the pump component exergy efficiency with the Rankine cycle is better than SRO.

Keywords: WHRPG, Rankine Cycle, Organic Rankine Cycle, Thermodynamics

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Yang Maha Esa Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul “Penerapan Siklus *Organic Rankine Cycle* (ORC) pada Teknologi *Waste Heat Recovery Power Generation* (WHRPG) pada Industri Semen dengan Proses Simulasi Termodinamika”. Skripsi ini dibuat dalam rangka memenuhi persyaratan kelulusan di Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta. Penulis menyadari bahwa penelitian ini dapat terwujud atas bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak.

Dalam kesempatan ini pula penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa, Allah SWT dengan rahmat dan karunianya penulis dapat menyelesaikan studi dan skripsi ini.
2. Orang tua yang selalu memberikan support pada segala kondisi.
3. Bapak Dr. Damora Rhakasywi, ST, MT, IPP dan Bapak Fahrudin, ST, MT, selaku dosen pembimbing 1 dan dosen pembimbing 2 yang telah menyediakan waktu dan tenaga untuk memberikan arahan serta nasihat kepada penulis sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
4. Bapak Dr. Muchamad Oktaviandri, ST, MT, IPM, ASEAN.Eng selaku Kepala Prodi Teknik Mesin.
5. Saudara-saudara Teknik Mesin 2018 yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk kesempurnaan skripsi ini. Akhir kata, penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi industri maupun para akademisi pada bidang terkait.

Jakarta, 07 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iv
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
NOMENKLATUR	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Batasan Masalah	7
1.4 Tujuan	7
1.5 Manfaat Penelitian	8
1.6 Sistematika Penulisan	8
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Proses Produksi Semen	9
2.2 Sumber Panas Produksi Semen	11

2.2.1 Suspension Preheater	11
2.2.2 Rotary Clinker Burner	13
2.2.3 Clinker Cooler.....	13
2.3 Waste Heat Recovery Power Generation	15
2.4 Siklus Termodinamika pada sistem Pembangkit Tenaga Uap	16
2.4.1 Siklus Rankine	17
2.4.2 Siklus Rankine Organik	18
2.5 Analisis Energi dan Exergi Sistem Kerja WHRPG.....	20
2.5.1 Turbin.....	21
2.5.2 Kondenser	22
2.5.3 Pompa	23
2.5.4 Boiler	23
2.5.5 Efisiensi Termal.....	24
2.6 Fluida Kerja Siklus Rankine Organik	24
2.7 Computer-Aided Process Engineering (CAPE)	29
2.8 Model Matematika Pada Proses Simulasi	30
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	32
3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan.....	32
3.2 Tahapan Penelitian	32
3.3 Variabel Penelitian	33
3.3.1 Variabel Bebas	33
3.3.2 Variabel Terikat	33
3.4 Prosedur Pengambilan Data	33
3.5 Pemodelan Dan Simulasi.....	34
3.6 Prosedur Pengujian.....	35
3.6.1 Spesifikasi Fluida Kerja.....	35

3.6.2 Desain Model WHRPG	36
3.6.3 Spesifikasi Gas Buang	38
3.7 Analisa Data	39
3.8 Diagram Alir.....	40
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1 Desain Teknologi WHRPG	41
4.1.1 Desain Siklus Rankine Teknologi WHRPG	41
4.1.2 Desain Siklus Rankine Organik Teknologi WHRPG	45
4.1.3 Perbandingan Desain WHRPG Hasil Simulasi	51
4.2 Daya Listrik Pada Teknologi WHRPG	56
4.2.1 Daya listrik pada Siklus Rankine.....	56
4.2.2 Daya Listrik pada Siklus Rankine Organik	57
4.2.3 Perbandingan Nilai Daya Listrik dari Hasil Simulasi.....	59
4.3 Efisiensi Termal Teknologi WHRPG.....	60
4.3.1 Nilai Efisiensi Termal dengan Siklus Rankine	60
4.3.2 Nilai Efisiensi Termal dengan Siklus Rankine Organik.....	61
4.3.3 Perbandingan Nilai Efisiensi Termal dari Hasil Simulasi	63
4.4 Destruksi Exergi Teknologi WHRPG	64
4.4.1 Destruksi Exergi pada komponen WHRPG.....	64
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1 Kesimpulan.....	69
5.2 Saran	70

DAFTAR PUSTAKA

RIWAYAT HIDUP

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1	Perbandingan penggunaan energi pada sektor industry	1
Gambar 2. 1	Proses Produksi Semen.....	11
Gambar 2. 2	Suspension Preheater	12
Gambar 2. 3	Rotary Clinker	13
Gambar 2. 4	Clinker Cooler	14
Gambar 2. 5	Diagram WHRPG Industri Semen.....	16
Gambar 2. 6	Siklus Rankine Ideal	17
Gambar 2. 7	Siklus Rankine Organik.....	19
Gambar 2. 8	Temperature titik didih fluida pada 1 atm	26
Gambar 2. 9	Tekanan dan Temperature Kritis	27
Gambar 3. 1	Desain Siklus Rankine Organik.....	37
Gambar 3. 2	Desain Siklus Rankine.....	38
Gambar 3. 3	Diagram Alir Penelitian.....	40
Gambar 4. 1	Flowsheet Teknologi WHRPG Siklus Rankine.....	42
Gambar 4. 2	Flowsheet WHRPG Siklus Rankine Organik dengan Fluida r-123	46
Gambar 4. 3	Flowsheet WHRPG Siklus Rankine Organik Fluida r-245fa.....	49
Gambar 4. 4	Diagram Perbandingan Mass Flow Rate	51
Gambar 4. 5	Diagram Perbandingan Temperatur Fluida Kerja	53
Gambar 4. 6	Diagram T-s WHRPG Siklus Rankine	54
Gambar 4. 7	Diagram T-s WHRPG ORC r-123.....	54
Gambar 4. 8	Diagram T-s WHRPG ORC r-245fa.....	54
Gambar 4. 9	Turbin Siklus Rankine	56
Gambar 4. 10	Turbin Siklus Rankine Organik r-123	57
Gambar 4. 11	Turbin Siklus Rankine Organik r-245fa	58
Gambar 4. 12	Diagram Perbandingan Nilai Daya Listrik	59
Gambar 4. 13	Diagram Perbandingan Nilai Efisiensi Termal.....	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbedaan Siklus Rankine dan Siklus Rankine Organik.....	19
Tabel 2. 2 Klasifikasi Keamanan Refrigerant ASHRAE 34	28
Tabel 2. 3 Fluida Kerja Siklus Rankine Organik dan Spesifikasi	29
Tabel 3. 1 Spesifikasi Fluida Kerja R-123	35
Tabel 3. 2 Spesifikasi Fluida Kerja R-245fa	36
Tabel 3. 3 Spesifikasi fluida Kerja Air	36
Tabel 3. 4 Nama Tipe Komponen	37
Tabel 3. 5 Spesifikasi Gas Panas	38
Tabel 4. 1 Spesifikasi Aliran Fluida Kerja Siklus Rankine.....	43
Tabel 4. 2 Persentase Error Hasil simulasi	44
Tabel 4. 3 Spesifikasi Aliran Fluida kerja r-123 Teknologi WHRPG	47
Tabel 4. 4 Spesifikasi Aliran Fluida kerja r-245fa Teknologi WHRPG	50
Tabel 4. 5 Selisih Entalpi antara fluida kerja pada siklus.....	52
Tabel 4. 6 Data Energi Komponen Siklus Rankine.....	60
Tabel 4. 7 Data Energi Komponen Siklus Rankine Organik Fluida r-123	61
Tabel 4. 8 Data Energi Komponen Siklus Rankine Organik Fluida r-245fa.....	62
Tabel 4. 9 Data Exergi WHRPG Komponen Penukar Panas	65
Tabel 4. 10 Data Exergi WHRPG pada Komponen Turbin dan Pompa	67

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1** Flowsheet WHRPG PT. Semen X
- Lampiran 2** Flowsheet WHRPG Siklus Rankine hasil simulasi
- Lampiran 3** Flowsheet WHRPG Siklus Rankine Organik r-123 hasil simulasi
- Lampiran 4** Flowsheet WHRPG Siklus Rankine Organik r-245fa hasil simulasi
- Lampiran 5** *Streams Summary* WHRPG Siklus Rankine
- Lampiran 6** *Streams Summary* WHRPG Siklus Rankine Organik r-123
- Lampiran 7** *Streams Summary* WHRPG Siklus Rankine Organik r-245fa
- Lampiran 8** Laju Aliran Exergi Hasil Simulasi

NOMENKLATUR

Simbol	Definisi	Satuan
\dot{W}_t	Kerja Turbin	Watt
\dot{m}	Mass flow Rate	t/h
\dot{W}_p	Kerja Pompa	Watt
\dot{Q}_{out}	Panas Keluar Kondensor	Watt
\dot{Q}_{in}	Panas Masuk Boiler	Watt
e	Laju exergi spesifik	kJ/kg
\dot{E}	Total laju exergi	kJ/s
\dot{E}_{dt}	Destruksi Exergi Turbin	Watt
\dot{E}_{dcond}	Destruksi Exergi Kondenser	Watt
\dot{E}_{dpump}	Destruksi Exergi Pompa	Watt
$\dot{E}_{dboiler}$	Destruksi Exergi boiler	Watt
η_{ex}	Efisiensi Exergi	%
η	Efisiensi Termal	%
h_1	Entalpi Fluida titik 1	kJ/kg.K
h_2	Entalpi Fluida titik 2	kJ/kg.K
h_3	Entalpi Fluida titik 3	kJ/kg.K
h_4	Entalpi Fluida titik 4	kJ/kg.K
ρ	Massa Jenis	kg/m ³
m	massa	kg
V	volume	m ³
P	Tekanan	Pa
R	Konstanta Gas	J/K.mol
T	Temperature	K
T_c	Temperatur Kritis	K
P_c	Tekanan Kritis	Pa
v	Molar Volume	Kg/mol