UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Analisis 3E (Energy, Exergy, and Environmental) pada Pemanfaatan Panas Gas Buang Pembangkit Listrik
Tenaga Mesin Gas Sei Gelam Menggunakan Sistem Organic Rankine Cycle**
Anthony Nathaniel, Dr. Ir. Hifni Mukhtar Ariyadi, S.T., M.Sc., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iv
DAFTAR ISI v
DAFTAR GAMBAR ix
DAFTAR TABEL xi
DAFTAR NOTASI xii
INTISARI xiii
ABSTRACT xv
BAB I PENDAHULUAN 17
1.1 Latar Belakang 17
1.2 Masalah Penelitian 20
1.3 Tujuan Penelitian 20
1.4 Manfaat Penelitian 21
1.5 Batasan Masalah 22
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 23
2.1 Penelitian Terdahulu 23
2.2 Keaslian Penelitian 25
BAB III LANDASAN TEORI 29
3.1 Prinsip Mesin PLTMG 29
3.2 Karakteristik Gas Buang 31
3.3 *Waste Heat Recovery* (WHR) 32
3.3.1 Pengertian dan Konsep Dasar 32
3.3.2 Efisiensi Pemanfaatan Panas Buang 35
3.4 Siklus Termodinamika *Organic Rankine Cycle* (ORC) 36
3.4.1 Prinsip Dasar Siklus Rankine 36
3.4.2 Konsep Dasar *Organic Rankine Cycle* 37
3.4.3 Diagram Termodinamika ORC 39
3.4.4 Jenis-Jenis Siklus ORC 40
3.5 Analisis Energi Sistem ORC 43
3.5.1 Neraca Massa dan Energi 43

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Analisis 3E (Energy, Exergy, and Environmental) pada Pemanfaatan Panas Gas Buang Pembangkit Listrik
Tenaga Mesin Gas Sei Gelam Menggunakan Sistem Organic Rankine Cycle**
Anthony Nathaniel, Dr. Ir. Hifni Mukhtar Ariyadi, S.T., M.Sc., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.5.2 Perhitungan Energi pada Komponen ORC 44
3.5.2.1 Kerja Pompa 44
3.5.2.2 Evaporator 44
3.5.2.3 Kerja Turbin 45
3.5.2.4 Kondensor 46
3.5.2.5 Efisiensi Sistem 46
3.6 Analisis Eksergi Sistem ORC 47
3.6.1 Analisis Eksergi Sistem ORC 47
3.6.2 Analisis Eksergi Destruktif pada Komponen ORC 48
3.6.2.1 Eksergi Destruktif Pompa 48
3.6.2.2 Eksergi Destruktif Evaporator 49
3.6.2.3 Eksergi Destruktif Turbin 50
3.6.2.4 Eksergi Destruktif Kondensor 50
3.6.2.5 Total Eksergi Destruktif 50
3.6.2.4 Efisiensi Eksergi 51
3.7 Analisis Lingkungan Sistem ORC 52
3.7.1 Penghematan Bahan Bakar 52
3.7.2 Reduksi Emisi CO_2 53
3.8 Fluida Kerja pada ORC 54
3.8.1 Pertimbangan Fluida Kerja 54
3.8.2 Parameter dalam Fluida Kerja 55
3.8.3 Pemilihan Fluida Kerja 55
3.9 Aspen HYSYS 58
BAB IV METODE PENELITIAN 60
4.1 Diagram Alir Penelitian 60
4.2 Tahapan Penelitian 61
4.2.1 Tahap Persiapan 61
4.2.2 Tahapan Pemodelan Sistem ORC 61
4.2.3 Analisis Hasil 65
4.3 Objek Penelitian 66

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Analisis 3E (Energy, Exergy, and Environmental) pada Pemanfaatan Panas Gas Buang Pembangkit Listrik
Tenaga Mesin Gas Sei Gelam Menggunakan Sistem Organic Rankine Cycle**
Anthony Nathaniel, Dr. Ir. Hifni Mukhtar Ariyadi, S.T., M.Sc., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

4.4 Alat Penelitian 67
4.4.1 Aspen HYSYS V14 67
4.4.2 *Microsoft Excel* 68
4.5 Asumsi Simulasi 68
4.6 Kondisi Operasi Simulasi 68

4.7 Skenario Simulasi 70
4.7.1 Variasi Temperatur Evaporasi pada $T_{exh,out}$ Tetap 70
4.7.2 Variasi Temperatur Gas Buang pada Selisih Temperatur Konstan ($\Delta T = 15^oC$) 71
4.8 Variabel Penelitian 72
4.8.1 Variabel Bebas (*Independent Variables*) 72
4.8.2 Variabel Terikat (*Independent Variables*) 72
4.8.3 Variabel Kontrol (*Controlled Variables*) 72
4.9 Matriks Penelitian 73

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN 75
5.1 Validasi Model Simulasi ORC 75
5.1.1 Validasi Komparatif terhadap Penelitian Shalaby dkk. (2022) 75
5.1.2 Validasi Hasil Simulasi terhadap Perhitungan Analisis 77
5.2 Analisis Hasil Simulasi 1 78
5.2.1 Analisis Energi Hasil Simulasi 1 78
5.2.1.1 Pengaruh Temperatur Evaporator pada Laju Aliran Massa 79
5.2.1.2 Pengaruh Temperatur Evaporator pada Daya Pompa 80
5.2.1.3 Pengaruh Temperatur Evaporator pada Daya Bersih ORC 81
5.2.1.4 Pengaruh Temperatur Evaporator pada Efisiensi Termal 83
5.2.2 Analisis Eksergi Hasil Simulasi 1 84
5.2.2.1 *Exergy Destruction* pada masing-masing komponen 84
5.2.2.2 Total *Exergy Destruction* Simulasi 1 Sistem ORC 86
5.2.2.3 Efisiensi Eksergi Simulasi 1 Sistem ORC 88
5.2.3 Analisis Lingkungan Hasil Simulasi 1 90
5.2.3.1 Analisis Penghematan Bahan Bakar 90

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Analisis 3E (Energy, Exergy, and Environmental) pada Pemanfaatan Panas Gas Buang Pembangkit Listrik
Tenaga Mesin Gas Sei Gelam Menggunakan Sistem Organic Rankine Cycle**
Anthony Nathaniel, Dr. Ir. Hifni Mukhtar Ariyadi, S.T., M.Sc., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

5.2.3.2 Analisis Penurunan Emisi CO_2 92
5.3 Analisis Hasil Simulasi 2 94
5.3.1 Analisis Energi Hasil Simulasi 2 95
5.3.1.1 Pengaruh Temperature *Exhaust* pada Laju Aliran Massa 95
5.3.1.2 Pengaruh Temperature *Exhaust* pada Daya Pompa 96
5.3.1.3 Pengaruh Temperature *Exhaust* pada Daya Bersih Turbin 98
5.3.1.4 Pengaruh Temperature *Exhaust* pada Efisiensi Termal 100
5.3.2 Analisis Eksergi Hasil Simulasi 2 101
5.3.2.1 *Exergy Destruction* pada masing-masing komponen 102
5.3.2.2 Total *Exergy Destruction* Simulasi 2 Sistem ORC 104
5.3.2.3 Efisiensi Eksergi Simulasi 2 Sistem ORC 105
5.3.3 Analisis Lingkungan Hasil Simulasi 2 107
5.3.3.1 Analisis Penghematan Bahan Bakar 107
5.3.3.2 Analisis Penurunan Emisi CO_2 109
5.4 Matriks Perbandingan Performa Fluida Kerja 110
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 114
6.1 Kesimpulan 114
6.2 Saran 115
DAFTAR PUSTAKA **116**

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Analisis 3E (Energy, Exergy, and Environmental) pada Pemanfaatan Panas Gas Buang Pembangkit Listrik
Tenaga Mesin Gas Sei Gelam Menggunakan Sistem Organic Rankine Cycle**
Anthony Nathaniel, Dr. Ir. Hifni Mukhtar Ariyadi, S.T., M.Sc., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram distribusi energi pada mesin diesel 23
Gambar 3.1 Mesin gas Wartsila 20V34SG 29
Gambar 3.2 Prinsip kerja mesin gas 30
Gambar 3.3 Siklus rankine 36
Gambar 3.4 *Organic rankine cycle* 38
*G*ambar 3.5 *T-s graphic organic rankine cycle* 39
Gambar 3.6 Skema *basic* ORC 41
Gambar 3.7 Skema *regenerative* ORC 42
Gambar 3.8 Skema *dual regeneration* ORC 42
Gambar 3.9 *Software Aspen HYSYS* 58
Gambar 4.1 Diagram alur penelitian 60
Gambar 4.2 Pemilihan *property package* 62
Gambar 4.3 Pemilihan fluida kerja simulasi ORC 62
Gambar 4.4 Parameter *input* gas buang evaporator 63
Gambar 4.5 Parameter *input* udara pendingin kondensor 64
Gambar 4.6 Parameter *input* pada turbin dan pompa 64
Gambar 4.7 Hasil model simulasi *basic* ORC 65
Gambar 4.8 *Layout* pembangkit dan *engine* PLTMG Sei Gelam 67
Gambar 5.1 Ilustrasi diagram T-s sistem ORC pada simulasi 1 78
Gambar 5.2 Pengaruh temperatur evaporator pada laju aliran massa 79
Gambar 5.3 Pengaruh temperatur evaporator pada daya pompa 80
Gambar 5.4 Pengaruh temperatur evaporator pada daya bersih ORC 81
Gambar 5.5 Pengaruh temperatur evaporator pada efisiensi termal 83
Gambar 5.6 Pengaruh temperatur evaporator pada total *exergy destruction* 87
Gambar 5.7 Pengaruh temperatur evaporator pada efisiensi eksergi 89
Gambar 5.8 Pengaruh temperatur evaporator pada penghematan bahan bakar 91
Gambar 5.9 Pengaruh temperatur evaporator pada penurunan emisi CO_2 92
Gambar 5.10 Ilustrasi diagram T-s sistem ORC pada simulasi 2 94
Gambar 5.11 Pengaruh temperatur *exhaust* pada laju aliran massa 95
Gambar 5.12 Pengaruh temperatur *exhaust* pada daya pompa 97

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Analisis 3E (Energy, Exergy, and Environmental) pada Pemanfaatan Panas Gas Buang Pembangkit Listrik
Tenaga Mesin Gas Sei Gelam Menggunakan Sistem Organic Rankine Cycle**
Anthony Nathaniel, Dr. Ir. Hifni Mukhtar Ariyadi, S.T., M.Sc., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5.13 Pengaruh temperatur *exhaust* pada daya bersih turbin 99
Gambar 5.14 Pengaruh temperatur *exhaust* pada efisiensi termal 100
Gambar 5.15 Pengaruh temperatur *exhaust* pada total *exergy destruction* 104
Gambar 5.16 Pengaruh temperatur *exhaust* pada efisiensi eksergi 106
Gambar 5.17 Pengaruh temperatur *exhaust* pada penghematan bahan bakar 108
Gambar 5.18 Pengaruh temperatur *exhaust* pada penurunan emisi CO_2 109

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Analisis 3E (Energy, Exergy, and Environmental) pada Pemanfaatan Panas Gas Buang Pembangkit Listrik
Tenaga Mesin Gas Sei Gelam Menggunakan Sistem Organic Rankine Cycle**
Anthony Nathaniel, Dr. Ir. Hifni Mukhtar Ariyadi, S.T., M.Sc., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu perkembangan sistem ORC 26
Tabel 3.1 Karakteristik gas buang mesin diesel 32
Tabel 3.2 Tipe-tipe panas buang dari beberapa sumber 33
Tabel 3.3 Kualitas dan kuantitas panas gas buang 34
Tabel 3.4 Potensi pemanfaatan gas buang dan *range temperature* 34
Tabel 3.5 Jenis-jenis konfigurasi sistem ORC 40
Tabel 3.6 Karakteristik fluida kerja 56
Tabel 4.1 Kondisi operasi simulasi 68
Tabel 4.2 Skenario simulasi 1 70
Tabel 4.3 Skenario simulasi 2 71
Tabel 4.5 Matriks penelitian 73
Tabel 5.1 Validasi hasil simulasi ORC terhadap penelitian terdahulu 76
Tabel 5.2 Validasi hasil simulasi terhadap perhitungan analitis 77
Tabel 5.3 Distribusi *exergy destruction* simulasi 1 85
Tabel 5.4 Distribusi *exergy destruction* simulasi 2 102
Tabel 5.5 Matriks perbandingan performa fluida kerja simulasi 1 111
Tabel 5.6 Matriks perbandingan performa fluida kerja simulasi 2 112

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Analisis 3E (Energy, Exergy, and Environmental) pada Pemanfaatan Panas Gas Buang Pembangkit Listrik
Tenaga Mesin Gas Sei Gelam Menggunakan Sistem Organic Rankine Cycle**
Anthony Nathaniel, Dr. Ir. Hifni Mukhtar Ariyadi, S.T., M.Sc., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR NOTASI

Huruf Latin

C_p	: Kapasitas panas spesifik	kJ/kg·K
CO_2 reduction	: Reduksi emisi CO_2	kg CO_2/kWh
$\dot{E}$	: Laju eksergi	kW
$\dot{E}_{exh}$	: Eksergi sumber panas (gas buang)	kW
$\dot{I}$	: Laju irreversibilitas/laju destruksi eksergi	kW
EF CO_2	: Faktor emisi CO_2	kg CO_2/Nm³
h	: Entalpi spesifik	kJ/kg
$\dot{m}$	: Laju aliran massa fluida	kg/s
$\dot{m}_{exh}$	: Laju massa gas buang	kg/s
$\dot{m}_{wf}$	: Laju massa fluida kerja (*working fluid*)	kg/s
P	: Tekanan	kPa atau bar
$\dot{Q}$	: Laju perpindahan panas	kW
$\dot{Q}_{cond}$	: Panas yang dibuang di kondensor	kW
$\dot{Q}_{in}$	: Panas yang diserap evaporator	kW
s	: Entropi spesifik	kJ/kg·K
SFC	: *Spesific Fuel Consumption*	kg atau Nm³
T_0	: Temperatur lingkungan referensi	K
T_{exh}	: Temperatur gas buang	K atau °C
v	: Volume spesifik	m³/kg
$\dot{W}$	: Laju kerja/daya	kW
$\dot{W}_{net}$	: Daya bersih ORC	kW
$\dot{W}_p$	: Daya pompa	kW
$\dot{W}_t$	: Daya turbin	kW

Huruf Yunani

e	: Eksergi spesifik	kJ/kg
$\eta\ th$	: Efisiensi termal siklus ORC	–
$\eta\ ex, cyc$	: Efisiensi eksergi siklus ORC	–

Singkatan

ODP	: *Ozone Depletion Potential*	–
GWP	: *Global Warming Potential*	–