

SKRIPSI

**ANALISIS EKSERGI DAN EKSERGOEKONOMI
SISTEM KOGENERASI TURBIN GAS
TANPA DAN DENGAN REGENERATOR**



RICKY WIJAYA

03051381924109

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2023

SKRIPSI

**ANALISIS EKSERGI DAN EKSERGOEKONOMI
SISTEM KOGENERASI TURBIN GAS
TANPA DAN DENGAN REGENERATOR**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar
Sarjana Teknik**



OLEH

**Ricky Wijaya
03051381924109**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2023**

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS EKSERGI DAN EKSERGOEKONOMI SISTEM KOGENERASI TURBIN GAS TANPA DAN DENGAN REGENERATOR

SKRIPSI

Diajukan untuk melengkapi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Teknik

Oleh :
RICKY WIJAYA
03051381924109

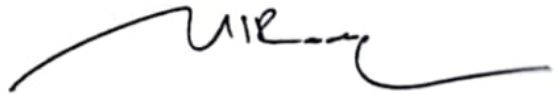
Palembang, 11 Oktober 2023
Diperiksa dan Disetujui Oleh:

Pembimbing 1,

Pembimbing 2,



Ir. Dyos Santoso, M.T
NIP. 196012231991021001




M. Ihsan Riady, S.T, M.T
NIP. 1987101320150103101



Mengetahui :
Ketua Jurusan Teknik Mesin,
Irsyadi Yuni, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
NIP. 197111251997021001

JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Agenda No. : 030/TM/AK/2023
Diterima Tanggal : 21/11/2023
Paraf : 

SKRIPSI

Nama : Ricky Wijaya
Nim : 03051381924109
Jurusan : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Analisis Eksergi dan Eksergoekonomi Sistem Kogenerasi Turbin Gas tanpa dan dengan Regenerator
Dibuat Tanggal : 11 Maret 2023
Selesai Tanggal : 11 Oktober 2023

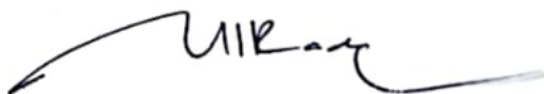
Palembang, 11 Oktober 2023
Diperiksa dan Disetujui Oleh:

Pembimbing 1,

Pembimbing 2,



Ir. Dyos Santoso, M.T
NIP. 196012231991021001



M. Ihsan Riady, S.T, M.T
NIP. 1987101320150103101



Irsyadi Yam, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
NIP. 197112231997021001

HALAMAN PERSETUJUAN



Karya tulis ilmiah berupa Skripsi ini dengan judul “Analisis Eksergi dan Eksergoekonomi Sistem Kogenerasi Turbin Gas tanpa dan dengan Regenerator” telah dipertahankan dihadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin Jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya pada tanggal 11 Oktober 2023.

Palembang, 11 Oktober 2023

Pembimbing :

Ir. Dyos Santoso, M.T
NIP. 196012231991021001

M. Ihsan Riady, S.T, M.T
NIP. 1987101320150103101


(.....)

(.....)

Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah berupa Skripsi,

Ketua :

Aneka Firdaus, S.T, M.T
NIP. 197502261999031001

Sekretaris :

Ellyanie, S.T, M.T
NIP. 196905011994122001

Anggota :

Dr. Dewi Puspitasari, S.T, M.T
NIP. 197001151994122001


(.....)

(.....)

(.....)

Mengetahui :
Ketua Tim Pengujian Teknik Mesin,



Irsyadi Yanti, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
NIP. 197112251997021001

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya berikan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas segala rahmat yang diberikan-Nya kepada saya, sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi ini berjudul “Analisis Eksergi dan Eksergoekonomi Sistem Kogenerasi Turbin Gas tanpa dan dengan Regenerator”. disusun untuk melengkapi salah satu syarat mendapatkan Gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.

Penulis juga banyak mengucapkan terima kasih, kepada pihak-pihak yang telah memberi bantuan, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyusunan skripsi ini:

1. Kedua orang tua dan saudara kandung yang memberikan motivasi selama proses pengerjaan skripsi.
2. Bapak Irsyadi Yani, S.T, M.Eng, Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya
3. Bapak Prof. Amir Arifin, S.T, M.Eng. Ph.D, IPP. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya.
4. Bapak Ir. Dyos Santoso, M.T dan Bapak M. Ihsan Riady, S.T., M.T selaku pembimbing skripsi, yang telah memberikan waktu, bimbingan, motivasi dan ilmu guna penyelesaian skripsi.
5. Ibu Ellyanie, S.T., M.T. selaku pembimbing akademik di Jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya
6. Bapak Gunawan, S.T, M.T Ph.D selaku pembina mahasiswa jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya
7. Seluruh Dosen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya atas semua bimbingan, ilmu dan nasihat selama perkuliahan.
8. Kedua orang tua dan saudara kandung yang memberikan motivasi selama proses pengerjaan skripsi.
9. Teman-teman Teknik Mesin Angkatan 2019.

Akhir kata, penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada seluruh pihak yang membantu dalam proses penyusunan skripsi, semoga Tuhan Yang Maha Esa

memberikan rahmat kebaikannya kepada seluruh pihak. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan dapat menjadi inspirasi dalam bidang ilmu pengetahuan di masa yang akan datang.

Palembang, 11 Oktober 2023



Ricky Wijaya
03051381924109

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ricky Wijaya

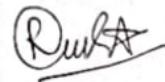
NIM : 03051381924109

Judul : Analisis Eksergi dan Eksergoekonomi Sistem Kogenerasi Turbin Gas
tanpa dan dengan Regenerator

memberikan izin kepada Pembimbing dan Universitas Sriwijaya untuk mempublikasikan hasil penelitian saya untuk kepentingan akademik apabila dalam waktu 1 (satu) tahun tidak mempublikasikan karya penelitian saya. Dalam kasus ini saya setuju untuk menempatkan Pembimbing sebagai penulis korespondensi (*corresponding author*).

Demikian pernyataan saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari pihak manapun.

Palembang, 11 Oktober 2023



Ricky Wijaya

NIM. 03051381924109

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ricky Wijaya

NIM : 03051381924109

Judul : Analisis Eksergi dan Eksergoekonomi Sistem Kogenerasi Turbin Gas
tanpa dan dengan Regenerator

menyatakan bahwa skripsi saya merupakan hasil karya saya sendiri didampingi tim pembimbing dan bukan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai dengan aturan yang berlaku.

Demikian pernyataan saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari pihak manapun.



Palembang, 11 Oktober 2023



Ricky Wijaya

NIM. 03051381924109

RINGKASAN

ANALISIS EKSERGI DAN EKSERGOEKONOMI SISTEM KOGENERASI TURBIN GAS TANPA DAN DENGAN REGENERATOR

Karya Tulis ilmiah berupa skripsi, 11 Oktober 2023

Ricky Wijaya;

Dibimbing Oleh Ir. Dyos Santoso, M.T dan M. Ihsan Riady, S.T, M.T

Exergy and Exergoeconomic Analysis of Gas Turbine Cogeneration Systems without and with Regenerator

xxxi + 82 halaman, 41 gambar, 9 tabel , 6 lampiran

Sumber energi yang digunakan untuk membangkitkan listrik di Indonesia yang masih berupa bahan bakar fosil yaitu gas alam. Sumber energi tersebut merupakan sumber energi yang tak terbarukan yang diperoleh dari sumber daya alam yang waktu pembentukannya sampai jutaan tahun. Sehingga pemanfaatan energi tersebut harus digunakan seefisien mungkin. PLTG merupakan pembangkit listrik yang masih banyak digunakan di Indonesia karena Indonesia salah satu negara penghasil bahan bakar fosil terbanyak dan PLTG memiliki kelebihan yaitu efisiensi termalnya tinggi sehingga biaya operasional lebih murah dibandingkan pembangkit lainnya. PLTG dapat dihubungkan dengan HRSG sehingga menjadi sistem kogenerasi turbin gas untuk memanfaatkan kembali gas buang turbin yang suhunya masih tinggi. Sistem kogenerasi turbin gas dapat dilakukan modifikasi, salah satu caranya adalah dengan menambahkan regenerator yang akan dikaji menggunakan analisis eksergi dan eksergoekonomi untuk mengetahui besarnya destruksi eksergi dan biaya destruksi eksergi sistem. Studi literatur yang digunakan penulis sebagai referensi adalah “*The Exergy Method Of Thermal Plant Analysis*” Karya Kotas dan “*Gas Turbine Third Edition Engineering Handbook*” Karya Boyce. Sebelum melakukan analisis eksergi dan eksergoekonomi dibutuhkan data operasi sistem kogenerasi turbin gas, pengambilan data operasi dilakukan di PT. Pertamina RU III Plaju. Data operasi sistem kogenerasi turbin gas meliputi kompresor, *combustion chamber*, turbin gas, *supplementary burner*, dan komponen pada HRSG meliputi *superheater*, *evaporator*, ekonomiser. Setelah dilakukan pengambilan data operasi maka dapat dilakukan analisis. Penelitian dilakukan dengan asumsi menggunakan kondisi lingkungan pada tekanan 1 atm dan temperatur 27°C dan data biaya investasi, operasi dan perawatan komponen berdasarkan literatur. Setelah dilakukan pengolahan data didapatkan hasil destruksi eksergi Pada sistem saat ini destruksi eksergi terbesar terjadi pada *combustion chamber* dan *supplementary burner* yaitu 25865,70 kW dan 9149,97 kW, dengan total destruksi eksergi sebesar 40585,59 kW, sedangkan pada sistem modifikasi destruksi eksergi terbesar terjadi pada *combustion chamber* dan *supplementary burner* yaitu 21153,61 kW dan 17727,53

kW, dengan total destruksi eksergi sebesar 44662,35 kW. Pada sistem saat ini komponen yang memiliki efisiensi eksergi terendah adalah *combustion chamber* dan *supplementary burner* yaitu 64,03% dan 65,66%, sedangkan pada sistem modifikasi efisiensi eksergi terendah ada pada *supplementary burner* dan *combustion chamber* yaitu 45,27% dan 72,20%. Pada sistem saat ini komponen yang memiliki rasio destruksi eksergi tertinggi adalah *combustion chamber* dan *supplementary burner* yaitu 37,87% dan 13,39%, sedangkan pada sistem modifikasi komponen yang memiliki rasio destruksi eksergi tertinggi adalah *supplementary burner* dan *compressor* yaitu 29,22% dan 24,49%. Efisiensi sistem saat ini pada sistem turbin gas adalah 23,85%, pada hrsg sebesar 79,66% dan pada sistem kogenerasi sebesar 57,95%, sedangkan pada sistem modifikasi, terjadi peningkatan efisiensi sistem turbin gas yaitu 32%, namun pada sistem hrsg terjadi penurunan menjadi 67,41% akibat penambahan kalor bahan bakar pada sistem, begitupun pada sistem kogenerasi mengalami penurunan menjadi 54,69%. Pada sistem saat ini biaya destruksi eksergi terbesar terjadi pada *combustion chamber* dan *supplementary burner* yaitu 1784,71 USD/h dan 384,30 USD/h, sedangkan pada sistem modifikasi biaya destruksi eksergi terbesar juga terjadi pada *combustion chamber* dan *supplementary burner* yaitu 1311,84 USD/h dan 909,60 USD/h. Penambahan regenerator memiliki keuntungan yaitu mengurangi destruksi eksergi, mengurangi biaya destruksi eksergi dan meningkatkan efisiensi saat sistem turbin gas beroperasi sendiri tanpa adanya penambahan HRSG. Namun, ketika turbin gas beroperasi sebagai sistem kogenerasi, manfaat penambahan regenerator akan hilang dan bahkan mungkin ada kerugian akibat penambahan kalor bahan bakar pada sistem.

Kata Kunci : kogenerasi turbin gas, regenerator, eksergi, destruksi eksergi, eksergoekonomi

Kepustakaan : 19 (1985-2021)

SUMMARY

EXERGY AND EXERGOECONOMIC ANALYSIS OF GAS TURBINE COGENERATION SYSTEMS WITHOUT AND WITH REGENERATOR

Scientific Writing in the form of Thesis, 11 October 2023

Ricky Wijaya;

Supervised by Ir. Dyos Santoso, M.T dan M. Ihsan Riady, S.T, M.T

Analisis Eksergi dan Eksergoekonomi Sistem Kogenerasi Turbin Gas tanpa dan dengan Regenerator

xxxii + 82 pages, 41 figures, 9 tables , 6 attachments

The most widely used energy sources for electricity generation in Indonesia is still fossil fuels such as natural gas. This energy source is a non-renewable energy source taken from natural resources that take millions of years to form. Therefore, energy use must be used as efficiently as possible. PLTG is a power plant that is still widely used in Indonesia, because Indonesia is one of the countries that produces the most fossil fuels and PLTG has the advantage of high thermal efficiency, so operating costs are cheaper than other countries. other power plants. PLTG can be connected to HRSG to become a gas turbine cogeneration system to reuse turbine exhaust gases that are still at high temperature. The gas turbine cogeneration system can be modified, one possibility is the addition of a regenerator which will be studied using exergy. and exergy economic analysis to determine the exergy destruction amount and exergy destruction cost of the system. The literature studies used by the author as references are “Exergy Analysis Method of Thermal Power Plants” by Kotas and “Gas Turbine Technical Handbook Third Edition” by Boyce. Before proceeding with exergy and exergy economics analysis, operating data on the gas turbine cogeneration system is required. Operational data collection is performed at PT. Pertamina RU III Plaju. The operating data of the gas turbine cogeneration system includes the compressor, combustion chamber, gas turbine, auxiliary burner, and HRSG components including superheater, evaporator, and economizer. After collecting operational data, analysis can be performed. The study was conducted assuming the use of environmental conditions at 1 atm pressure, 27°C temperature and data on investment, operating and maintenance costs of components based on documents. After processing the data, exergy destruction results are obtained. In the present system, the largest exergy destruction occurs in the combustion chamber and supplementary burner are 25865,70 kW and 9149,97 kW, with a total exergy destruction of 40585,59 kW, while in the present system, the largest exergy destruction occurs in the combustion chamber and additional burner are 21153,61 kW and 17727,53 kW, with a total energy destruction of 44662,35 kW. In the current system, the components with the lowest exergy efficiency are combustion chamber and supplementary burner 64,03% and 65,66%, while in the

modified system, the exergy efficiency The lowest was found in the supplementary burner and combustion chamber 45,27% and 72,20%. In the current system, the components with the highest exergy destruction ratio are the combustion chamber and additional burner 37,87% and 13,39%, while in the modified system, the components The additional combustion chamber has the highest exhaust gas decomposition rate. burner and compressor, specifically 29,22% and 24,49%. The current system efficiency in the gas turbine system is 23,85%, now it is 79,66% and in the cogeneration system it is 57,95%, while in the modified system, there is an increase in the efficiency of the gas turbine system of 32%, but in the HRSG system, the decrease is up to 67,41% due to the addition of fuel heat to the system, as well as 'in the cogeneration system, decreasing to 54,69%. In the modified system, the highest exergy destruction costs occur in the combustion chamber and supplementary burner are 1,784.71 USD/h and 384,30 USD/h, while in the modified system, The highest exergy destruction costs also occur in the combustion chamber and supplementary burner, specifically 1311,84 USD/h and 909,60 USD/h. The addition of a regenerator has the benefits of reducing exergy destruction, reducing exergy destruction costs and increasing efficiency when the gas turbine system operates alone without the addition of an HRSG. However, when the gas turbine operates as a cogeneration system, the benefit of adding a regenerator is lost and there may even be losses due to the addition of fuel heat to the system.

Keywords : cogeneration, gas power plant, energy, exergy, exergy destruction, exergoeconomic

Citations : 19 (1985-2021)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	v
HALAMAN REGISTRASI	vii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ix
KATA PENGANTAR	xi
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	xiii
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS.....	xv
RINGKASAN	xvii
SUMMARY	xix
DAFTAR ISI.....	xxi
DAFTAR GAMBAR	xxv
DAFTAR TABEL.....	xxvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxix
NOMENKLATUR.....	xxxii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Siklus Turbin Gas	5
2.1.1 Turbin Gas Siklus Sederhana	5
2.1.2 Turbin Gas Dengan Regenerator	6
2.1.3 Turbin Gas Dengan <i>Intercooler</i> , <i>Regenerator</i> dan <i>Reheater</i>	8
2.2 Sistem Kogenerasi Turbin Gas	9
2.3 <i>Heat Recovery Steam Generator</i>	9
2.3.1 Ekonomiser.....	10
2.3.2 <i>Evaporator</i>	11
2.3.3 <i>Superheater</i>	11
2.4 Model Sistem Kogenerasi Turbin Gas	11

2.5	Analisis Termodinamika	13
2.5.1	Analisis Energi	14
2.5.2	Analisis Eksergi	14
2.5.2.1	Eksergi Pada Kompresor	15
2.5.2.2	Eksergi Pada <i>Combustion Chamber</i>	15
2.5.2.3	Eksergi Pada Turbin Gas	16
2.5.2.4	Eksergi Pada <i>Supplementary Burner</i>	17
2.5.2.5	Eksergi Pada <i>Superheater</i>	17
2.5.2.6	Eksergi Pada <i>Evaporator</i>	18
2.5.2.7	Eksergi Pada Ekonomiser	19
2.5.2.8	Eksergi Pada Regenerator	19
2.5.3	Efisiensi Eksergi	20
2.5.4	Rasio Destruksi Eksergi	20
2.5.5	Analisis Eksergoekonomi	21
2.6	Efisiensi Sistem	22
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		23
3.1	Diagram Alir	23
3.2	Studi Literatur	24
3.3	Asumsi Umum	24
3.4	Pengumpulan Data	24
3.5	Analisis dan Pengolahan Data	26
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		27
4.1	Data Operasi Sistem Kogenerasi Turbin Gas	27
4.2	Analisis Energi <i>Existing System</i>	27
4.3	Analisis Eksergi <i>Existing System</i>	29
4.3.1	Analisis Eksergi Pada Kompresor	29
4.3.2	Analisis Eksergi Pada <i>Combustion Chamber</i>	31
4.3.3	Analisis Eksergi Pada Turbin Gas	33
4.3.4	Analisis Eksergi Pada <i>Supplementary Burner</i>	35
4.3.5	Analisis Eksergi Pada <i>Superheater</i>	36
4.3.6	Analisis Eksergi Pada <i>Evaporator</i>	38
4.3.7	Analisis Eksergi Pada Ekonomiser	39
4.4	Efisiensi <i>Existing System</i>	41
4.4.1	Efisiensi Sistem Turbin Gas	41
4.4.2	Efisiensi <i>Heat Recovery Steam Generator</i>	42
4.4.3	Efisiensi Sistem Kogenerasi Turbin Gas	42

4.5	Analisis Eksergoekonomi <i>Existing System</i>	42
4.5.1	Analisis Eksergoekonomi Pada Kompresor	43
4.5.2	Analisis Eksergoekonomi Pada <i>Combustion Chamber</i>	43
4.5.3	Analisis Eksergoekonomi Pada Turbin Gas	44
4.5.4	Analisis Eksergoekonomi Pada <i>Supplementary Burner</i>	45
4.5.5	Analisis Eksergoekonomi Pada <i>Superheater</i>	46
4.5.6	Analisis Eksergoekonomi Pada <i>Evaporator</i>	47
4.5.7	Analisis Eksergoekonomi Pada Ekonomiser	47
4.6	Analisis Energi Sistem Modifikasi	48
4.6.1	Analisis Energi Pada Regenerator	49
4.7	Analisis Eksergi Sistem Modifikasi	51
4.7.1	Analisis Eksergi Pada Regenerator	51
4.7.2	Analisis Eksergi Pada <i>Combustion Chamber</i> Sistem Modifikasi	52
4.7.3	Analisis Eksergi Pada <i>Supplementary Burner</i> Sistem Modifikasi	54
4.7.4	Analisis Eksergi Pada Kompresor Sistem Modifikasi.....	55
4.7.5	Analisis Eksergi Pada Turbin Gas Sistem Modifikasi	56
4.7.6	Analisis Eksergi Pada <i>Superheater</i> Sistem Modifikasi	58
4.7.7	Analisis Eksergi Pada <i>Evaporatori</i> Sistem Modifikasi	59
4.7.8	Analisis Eksergi Pada Ekonomiser Sistem Modifikasi	60
4.8	Efisiensi Sistem Modifikasi.....	62
4.8.1	Efisiensi Sistem Turbin Gas Modifikasi.....	62
4.8.2	Efisiensi <i>Heat Recovery Steam Generator</i> Modifikasi.....	62
4.8.3	Efisiensi Sistem Kogenerasi Turbin Gas Modifikasi.....	63
4.9	Analisis Eksergoekonomi Sistem Modifikasi	63
4.9.1	Analisis Eksergoekonomi Regenerator	63
4.9.2	Analisis Eksergoekonomi <i>Combustion Chamber</i> Sistem Modifikasi ..	64
4.9.3	Analisis Eksergoekonomi <i>Supplementary Burner</i> Sistem Modifikasi .	65
4.10	Pembahasan	66
4.10.1	Destruksi Eksergi.....	67
4.10.2	Efisiensi Eksergi.....	68
4.10.3	Rasio Destruksi Eksergi Terhadap Bahan Bakar.....	69
4.10.4	Efisiensi Termal Sistem.....	70
4.10.5	Biaya Destruksi Eksergi	71
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		73
5.1	Kesimpulan.....	73
5.2	Saran	74

DAFTAR PUSTAKA.....	75
LAMPIRAN	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Siklus turbin gas sederhana	5
Gambar 2.2	T-s diagram siklus sederhana	6
Gambar 2.3	Siklus turbin gas dengan regenerator	6
Gambar 2.4	T-s diagram turbin gas dengan regenerator	7
Gambar 2.5	Turbin gas dengan intercooler, regenerator dan reheater	8
Gambar 2.6	Sistem kogenerasi turbin gas	9
Gambar 2.7	Diagram alir HRSG	10
Gambar 2.8	Diagram alir sistem kogenerasi turbin gas <i>existing system</i>	12
Gambar 2.9	Diagram alir sistem kogenerasi turbin gas sistem modifikasi	12
Gambar 2.10	Kontrol volume termodinamika	13
Gambar 2.11	Diagram alir kompresor	15
Gambar 2.12	Diagram alir <i>combustion chamber</i>	15
Gambar 2.13	Diagram alir turbin gas	16
Gambar 2.14	Diagram alir <i>supplementary burner</i>	17
Gambar 2.15	Diagram alir <i>superheater</i>	17
Gambar 2.16	Diagram alir <i>evaporator</i>	18
Gambar 2.17	Diagram alir ekonomiser	19
Gambar 2.18	Diagram alir regenerator	19
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	23
Gambar 4.1	Diagram T-s kogenerasi turbin gas <i>existing system</i>	28
Gambar 4.2	Diagram grassman kompresor	30
Gambar 4.3	Diagram grassman <i>combustion chamber</i>	32
Gambar 4.4	Diagram grassman turbin gas	33
Gambar 4.5	Diagram grassman <i>supplementary burner</i>	35
Gambar 4.6	Diagram grassman <i>superheater</i>	37
Gambar 4.7	Diagram grassman <i>evaporator</i>	38
Gambar 4.8	Diagram grassman ekonomiser	40
Gambar 4.9	Diagram T-s kogenerasi turbin gas modifikasi	50
Gambar 4.10	Diagram grassman regenerator	51

Gambar 4.11	Diagram alir <i>combustion chamber</i> modifikasi.....	53
Gambar 4.12	Diagram alir <i>supplementary burner</i> modifikasi.....	54
Gambar 4.13	Diagram alir kompresor modifikasi	55
Gambar 4.14	Diagram alir turbin gas modifikasi	57
Gambar 4.15	Diagram alir <i>superheater</i> modifikasi	58
Gambar 4.16	Diagram alir <i>evaporator</i> modifikasi	59
Gambar 4.17	Diagram alir ekonomiser modifikasi	61
Gambar 4.18	Grafik perbandingan destruksi eksergi sistem saat ini dan sistem modifikasi	67
Gambar 4.19	Grafik perbandingan efisiensi eksergi sistem saat ini dan sistem modifikasi	68
Gambar 4.20	Grafik perbandingan rasio destruksi eksergi sistem saat ini dan sistem modifikasi	69
Gambar 4.21	Grafik perbandingan efisiensi sistem saat ini dan sistem modifikasi	70
Gambar 4.22	Grafik perbandingan biaya destruksi eksergi sistem saat ini dan sistem modifikasi	71

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Data biaya investasi, operasi dan perawatan komponen.....	22
Tabel 3.1	Data operasi sistem kogenerasi turbin gas	25
Tabel 4.1	Parameter operasi sistem kogenerasi turbin gas.....	27
Tabel 4.2	Nilai entalpi dan entropi <i>existing system</i>	28
Tabel 4.3	Destruksi eksergi, efisiensi eksergi dan rasio destruksi eksergi sistem saat ini	41
Tabel 4.4	Biaya destruksi eksergi sistem saat ini	48
Tabel 4.5	Nilai entalpi dan entropi sistem modifikasi.....	50
Tabel 4.6	Destruksi eksergi, efisiensi eksergi dan rasio destruksi eksergi sistem modifikasi.....	62
Tabel 4.7	Biaya destruksi eksergi sistem modifikasi	66

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Tabel A7.1 <i>Ideal Gas Properties of Air</i>	77
Lampiran 2	Tabel B.1.4 <i>Compressed Liquid Water</i>	78
Lampiran 3	Tabel B.1.2 <i>Saturated Water</i>	79
Lampiran 4	Tabel B.1.3 <i>Superheated Vapor Water</i>	80
Lampiran 5	Tabel Biaya Investasi, Operasi dan Perawatan Komponen.....	81
Lampiran 6	Surat Pengambilan Data	82

NOMENKLATUR

Lambang	Keterangan	Satuan
\dot{m}	Laju aliran massa	kg/s
\dot{E}_x	Laju eksergi	kW
e_x	Eksergi spesifik	kJ/kg
T	Temperatur	K
P	Tekanan	bar
h	Entalpi spesifik	kJ/kg
s	Entropi spesifik	kJ/kg.K
\dot{Q}	Laju kalor	kW
\dot{W}	Laju kerja	kW
\dot{C}	Laju aliran biaya	USD/kWh
\dot{Z}	Biaya investasi, operasi dan perawatan komponen	USD/h
ψ	Efisiensi eksergi	%
y	Rasio eksergi terhadap bahan bakar	%
φ	Rasio eksergi gas alam	-
LHV	<i>Low Heating Value</i>	kJ/kg
c	Biaya eksergi per unit	USD/kWh
η	Efisiensi termal	%

Subskrip

q	Kalor
w	Kerja
D	Destruksi
i	<i>Inlet</i>
o	<i>Outlet</i>
0	Parameter nilai lingkungan
f	<i>Fuel</i>
Tot	Total
u	Udara
g	Gas
fg	Flue gas
a	Air
bb	Bahan bakar
C	Kompresor
CC	<i>Combustion chamber</i>
GT	Turbin gas
SB	<i>Supplementary burner</i>
Sh	<i>Superheater</i>
Evap	<i>Evaporator</i>
Eco	Ekonomiser

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sumber energi yang digunakan untuk membangkitkan listrik di Indonesia masih berupa bahan bakar fosil yaitu minyak bumi, gas alam dan batubara. Sumber energi tersebut merupakan sumber energi yang tak terbarukan yang diperoleh dari sumber daya alam yang waktu pembentukannya sampai jutaan tahun. Oleh karena itu jumlahnya terbatas dan jika digunakan terus menerus, sumber daya alam ini akan habis dan tidak bisa diperbarui lagi. Gas alam merupakan salah satu sumber energi yang digunakan untuk pembangkitan listrik di Indonesia. Menurut Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada tahun 2021 mengemukakan rata-rata produksi gas alam sebesar 6 miliar kaki kubik per hari, maka umur cadangan gas alam masih 19,9 tahun apabila diasumsikan tidak ada temuan cadangan baru. PLTG merupakan pembangkit listrik yang masih banyak digunakan di Indonesia karena Indonesia salah satu negara penghasil bahan bakar fosil terbanyak (ESDM, 2021).

Menurut data statistik Kementerian ESDM tahun 2022, kapasitas terpasang pembangkit listrik di Indonesia mencapai 81.200 MW. Jenis pembangkit listrik di Indonesia didominasi oleh pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dengan jumlah kapasitas terpasang sebesar 42.100 MW, kemudian pembangkit listrik tenaga gas dan gas uap (PLTG / PLTGU) dengan kapasitas terpasang sebesar 21.600 MW, kapasitas pembangkit listrik energi baru terbarukan sebesar 12.500 MW dan pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) dengan kapasitas terpasang sebesar 5.000 MW. PLTG memiliki kelebihan yaitu efisiensi termalnya tinggi sehingga biaya operasional lebih murah dibandingkan pembangkit lainnya. Namun PLTG ini memiliki kekurangan yaitu gas buang turbin yang temperaturnya masih sangat tinggi langsung dibuang menuju atmosfer melalui *stack*, yang seharusnya gas buang tersebut dapat dimanfaatkan untuk memanaskan air yang akan diubah menjadi uap

jenuh bertekanan tinggi menggunakan *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) yang juga biasa disebut dengan sistem kogenerasi turbin gas, namun sebelum masuk ke HRSG gas buang turbin akan masuk ke *supplementary burner* yang akan diinjeksikan dengan bahan bakar untuk menghasilkan temperatur yang lebih tinggi dari sebelumnya. (Sanaye, dkk., 2017).

Sistem kogenerasi turbin gas adalah usaha untuk memanfaatkan gas buang turbin yang suhunya masih sangat tinggi untuk membangkitkan 2 energi berbeda yang berasal dari 1 sumber bahan bakar. Dalam hal ini 2 energi tersebut adalah energi mekanik yang disalurkan menuju generator untuk menghasilkan energi listrik dan energi termal berupa panas gas buang yang disalurkan menuju HRSG yang menghasilkan uap. HRSG adalah komponen pada sistem kogenerasi turbin gas yang digunakan untuk memanfaatkan kembali panas dari gas buang turbin gas yang memiliki temperatur tinggi dan disalurkan untuk menghasilkan uap. Uap yang dihasilkan ini digunakan untuk memutar turbin uap. Penerapan sistem kogenerasi turbin gas ini bertujuan untuk memanfaatkan kembali gas buang turbin yang awalnya terbuang percuma ke atmosfer, kini dapat dimanfaatkan sebagai energi termal untuk memutar turbin uap. (Mrzizak, dkk., 2021).

Sistem kogenerasi turbin gas dapat dilakukan modifikasi. Pada penelitian yang kami lakukan ini modifikasi dilakukan dengan cara menambahkan regenerator pada sistem kogenerasi. Regenerator bekerja sebagai alat penukar kalor, tujuan ditambahkan regenerator adalah agar temperatur udara yang masuk ke *combustion chamber* lebih tinggi dibandingkan tanpa adanya regenerator. Sehingga dengan adanya penambahan regenerator dapat dibandingkan performansi antara sistem saat ini dan sistem yang telah dimodifikasi, yang akan dikaji menggunakan analisis eksergi dan eksergoekonomi.

Analisis eksergi merupakan salah satu metode penting karena dapat mendeteksi kerugian akibat destruksi eksergi. Beberapa penelitian terdahulu dalam analisis eksergi yang pernah dilakukan (A. Bejan, 1982) yaitu mendeskripsikan teknik dasar dari analisis eksergi dan juga membahas metode evaluasi dalam pembangkitan entropi atau destruksi eksergi. (Riady, M. I., Santoso, D., & Bustan, M. D., 2019), menganalisis siklus kombinasi dengan menggunakan kombinasi *pinch* dan analisis eksergi sehingga didapatkan hasil peningkatan pada siklus

kombinasi dan diketahui kerugian eksergi tiap komponen. (Martin, dkk., 2016), menganalisis performansi pada sistem turbin gas 20 MW di Pekanbaru menggunakan analisis eksergi sehingga didapatkan hasil kerugian eksergi minimum pada sistem turbin gas.

Analisis eksergoekonomi merupakan analisa terhadap biaya yang diakibatkan oleh destruksi eksergi tersebut yang akan digabungkan dengan nilai ekonomi dalam analisisnya, penelitian yang dilakukan (Baghernejad dan Anvari, 2021), melakukan analisis eksergoekonomi pada sistem kogenerasi turbin gas sehingga dengan melakukan analisis eksergi dan memasukkan nilai ekonomi didapatkan biaya destruksi eksergi pada sistem tersebut.

Oleh karena itu dengan menggunakan metode analisis eksergi dan eksergoekonomi pada sistem kogenerasi turbin gas dapat diketahui besar dan lokasi terjadinya destruksi eksergi dan biaya destruksi eksergi.

1.2 Rumusan Masalah

Pada sistem turbin gas, gas buang turbin yang keluar dari turbin gas, yang masih memiliki temperatur tinggi langsung dibuang menuju *stack*, sehingga banyak energi yang terbuang ke lingkungan. Oleh karena itu, gas buang turbin tersebut dapat dimanfaatkan kembali untuk memanaskan udara yang keluar dari kompresor sebelum masuk ruang bakar menggunakan regenerator. Dengan meningkatnya temperatur udara masuk ke ruang bakar akan mengurangi kebutuhan bahan bakar sehingga efisiensi turbin dapat meningkat. Pada studi ini, evaluasi performansi ini dilakukan dengan menggunakan analisis eksergi dan eksergoekonomi pada sistem kogenerasi turbin gas tanpa dan dengan regenerator.

1.3 Batasan Masalah

Studi kasus ini dilakukan pada sistem kogenerasi turbin gas PT. Pertamina RU III Plaju pada *existing system* dan sistem yang akan dimodifikasi dengan penambahan regenerator pada keadaan lingkungan dengan tekanan 1 atm dan temperatur 27 °C.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari analisis eksergi dan eksergoekonomi pada pembangkit sistem kogenerasi turbin gas adalah untuk mendapatkan hasil seberapa besarnya peningkatan performansi dengan adanya penambahan regenerator. Disamping itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mendapatkan besar dan lokasi terjadinya destruksi eksergi dan biaya destruksi eksergi serta efisiensi sistem kogenerasi turbin gas, baik tanpa regenerator maupun dengan regenerator.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang didapatkan dalam penelitian ini adalah sebagai referensi ilmiah untuk turut berkontribusi memberikan informasi terhadap performansi sistem kogenerasi turbin gas.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdalla, dkk. (2021) "Regenerative Gas Turbine Power Plant: Performance & Evaluation" International Compressor Engineering Conference. Paper 2694.
- Allus, Muamer & Peterovic, Milan. (2005) Optimization of Parameters For Heat Recovery Steam Generator In Combined Cycle Plants.
- Baghernejad, A. Dan Anvari, M. A. (2021) "Exergoeconomic and Environmental Analysis and Multi Objective Optimization of a New Regenerative Gas Turbine Combined Cycle" Appl. Sci., 11, 11554.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G. & Moran, M. (1995) Thermal Design and Optimization.
- Boyce, Meherwan P. (2006) Gas Turbine Third Edition Engineering Handbook.
- Cengel, Y. A. dan Boles, M. A. (2006) Thermodynamics An Engineering Approach.
- ESDM (2021) Cadangan Minyak Indonesia dan Cadangan Gas. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Kotas, T. J. (1985) The Exergy Method Of Thermal Plant Analysis.
- Martin, dkk. (2016) "Exergy Analysis Of Gas Turbine Power Plant 20 MW In Pekanbaru-Indonesia" International Journal Of Techonology, 5, 921-927.
- Mrzijak, dkk. (2021) "Energy Analysis Of A Gas Turbine Upgraded With Heat Regenerator" Journal Technological: Conference Paper.
- Mrzijak, V., Perčić, G. & Prpić, O. J. (2018) "Gas Turbine Upgrade with Heat Regenerator - Numerical Analysis of Advantages and Disadvantages" International Scientific Journal.
- Nadir, M., Ghenaiet, A., & Carcasci, C. (2016) "Thermo-economic Optimization of Heat Recovery Steam Generator For A Range of Gas Turbine Exhaust Temperatures" Applied Thermal Engineering, 106, 811–826.
- Nag, P. K. (2005) Power Plant Engineering.
- Omar, H., Kamel, A., & Alsanousi, M. (2017) "Performance Of Regenerative Gas Turbine Power Plant" Energy and Power Engineering, 9, 136-146.
- Ozkan, D. B., Kiziler, O., & Bilge, D. (2012) "Exergy Analysis Of A Cogeneration Plant" International Journal Of Mechanical And Aerospace Engineering".

- Riady, M. I., Santoso, D., & Bustan, M. D. (2019) "Thermodynamics Performance Evaluation in Combined Cycle Power Plant by Using Combined Pinch and Exergy Analysis" *Journal of Physics: Conference Series*.
- Sanaye, dkk. (2017) "Thermoeconomic Optimization of Heat Recovery Steam Generators" *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 3(17), 803–810.
- Tadese, T., Tesema, G. (2015) "Energy, Entropy And Exergy Cincepts: Thermodynamic Approach" *Journal of Research in Science and Technology*, 3(5).
- Tiwari, A. K., Hasan, M. M., Islam, M. (2013) "Exergy Analysis of Combined Cycle Power Plant: NTPC Dadri, India" *International Journal of Thermodynamics*, 16(1), 36-42.
- Vosough, A., Noghrehabadi, A., Ghalambaz, M., & Vosough, S. (2011) "Exergy Concept And Its Characteristic" *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, 2(4), 47–52.