

SKRIPSI

**ANALISIS ENERGI DAN EKSERGI
SISTEM KOGENERASI TURBIN GAS
TANPA DAN DENGAN EVAPORATIVE COOLING**



RICO NATANAEL SUSETYO

03051281924074

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2023

SKRIPSI

**ANALISIS ENERGI DAN EKSERGI
SISTEM KOGENERASI TURBIN GAS
TANPA DAN DENGAN EVAPORATIVE COOLING**

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



OLEH

**Rico Natanael Susetyo
03051281924074**

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

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS ENERGI DAN EKSERGI SISTEM KOGENERASI TURBIN GAS TANPA DAN DENGAN EVAPORATIVE COOLING

SKRIPSI

Diajukan untuk melengkapi salah satu syarat memperoleh Gelar
Sarjana Teknik

Oleh:

RICO NATANAEL SUSETYO
03051281924074

Palembang, Oktober 2023

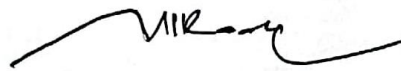
Diperiksa dan disetujui oleh:

Pembimbing 1,

Pembimbing 2,

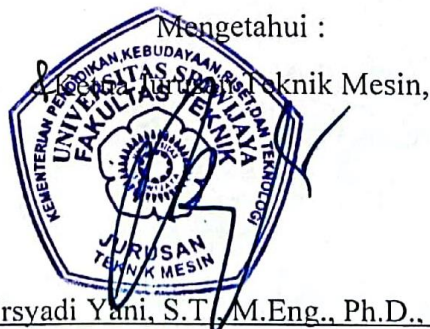


Ir. Dyos Santoso, M.T
NIP. 196012231991021001




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

Mengetahui :


Jurusan Teknik Mesin,

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

JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Agenda No. : 031 / TM / AK / 2023
Diterima Tanggal : 21 / 11 / 2023
Paraf : 

SKRIPSI

NAMA : Rico Natanael Susetyo
NIM : 03051281924074
JURUSAN : Teknik Mesin
JUDUL SKRIPSI : Analisis Energi dan Eksergi Sistem Kogenerasi Turbin Gas tanpa dan dengan Evaporative Cooling
DIBUAT TANGGAL : 11 Maret 2023
SELESAI TANGGAL : 11 Oktober 2023

Palembang, Oktober 2023

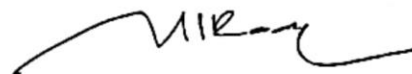
Diperiksa dan disetujui oleh:

Pembimbing 1,

Pembimbing 2,




Ir. Dyos Santoso, M.T
NIP. 196012231991021001



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

Mengetahui :


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

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa Skripsi ini dengan judul “Analisis Energi dan Eksergi Sistem Kogenerasi Turbin Gas tanpa dan dengan *Evaporative Cooling*” 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

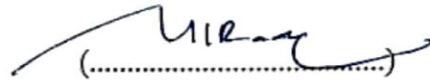
Pembimbing :

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 :

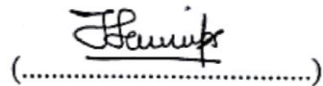
Ellyanie, S.T, M.T
NIP. 196905011994122001



(.....)

Anggota :

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



(.....)



Mengetahui :
Dekan Fakultas Teknik Mesin,

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

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas segala rahmat, hikmat bijaksana, serta penyertaan yang diberikan kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Energi dan Eksergi Sistem Kogenerasi Turbin Gas tanpa dan dengan *Evaporative Cooling*”.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan yang telah diberikan dari berbagai pihak, akan terkendala di dalam pengerjaannya. Maka dari itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua, adik, dan segenap keluarga besar penulis yang selalu memberi doa dan dukungan dalam pengerjaan skripsi ini.
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 Gunawan, S.T, M.T Ph.D. selaku pembina mahasiswa jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya.
5. Bapak Ir. Dyos Santoso, M.T dan Bapak M. Ihsan Riady, S.T., M.T selaku pembimbing skripsi, yang telah memberikan waktu, tenaga, kritik, saran, dan ilmu kepada penulis dalam proses penyelesaian skripsi ini.
6. Bapak Dipl. Ing. Ir. Amrifan Saladin Mohruni, Ph.D. selaku dosen pembimbing akademik di Jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya.
7. Bapak Budi Hartono selaku Senior Supervisor bagian REIE Kilang PT KPI RU III Plaju, serta segenap staff karyawan yang membimbing, serta membantu penulis dalam proses pengambilan data.
8. Bapak Iskandar selaku Section Head Utilities, dan Bapak Darmansah selaku Senior Supervisor Utilities Kilang PT KPI RU III Plaju, yang membantu penulis melengkapi data yang dibutuhkan.
9. Bapak Teguh Prasetyo Adi selaku Section Head MA 4, yang menjadi pengawas dan pemandu dalam pengambilan data.
10. Teman-teman seperjuangan Jurusan Teknik Mesin angkatan 2019.

11. Dan kepada semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu atas seluruh dukungan, masukan, serta bantuan baik secara langsung maupun tidak langsung kepada penulis, dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Maka dari itu, penulis membuka diri terhadap kritik dan saran yang membangun sehingga dalam penulisan selanjutnya dapat lebih baik lagi. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan pihak yang berkepentingan.

Palembang, Oktober 2023



Rico Natanael Susetyo
03051281924074

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rico Natanael Susetyo

NIM : 03051281924074

Judul : Analisis Energi dan Eksergi Sistem Kogenerasi Turbin Gas tanpa dan dengan Evaporative Cooling

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, Oktober 2023



Rico Natanael Susetyo
NIM. 03051281924074

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rico Natanael Susetyo

NIM : 03051281924074

Judul : Analisis Energi dan Eksergi Sistem Kogenerasi Turbin Gas tanpa dan dengan Evaporative Cooling

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, Oktober 2023



Rico Natanael Susetyo

NIM. 03051281924074

RINGKASAN

ANALISIS ENERGI DAN EKSERGI SISTEM KOGENERASI TURBIN GAS TANPA DAN DENGAN EVAPORATIVE COOLING

Karya Tulis ilmiah berupa skripsi, 11 Oktober 2023

Rico Natanael Susetyo;

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

Energy and Exergy Analysis of Gas Turbine Cogeneration Systems without and with Evaporative Cooling

xxxi + 81 halaman, 39 gambar, 7 tabel, 7 lampiran

Kebutuhan energi listrik sudah menjadi kebutuhan pokok di kehidupan manusia zaman sekarang. Diperlukan suatu sumber energi untuk bisa menghasilkan energi listrik. Dari sekian banyak sumber energi, bahan bakar fosil seperti gas alam masih menjadi pilihan dalam upaya memenuhi kebutuhan energi listrik. Ketersediaan dari bahan bakar fosil ini menjadi perhatian dikarenakan jumlahnya yang terbatas dan dapat habis sewaktu-waktu. Maka dari itu, pemanfaatan sumber energi harus dilakukan dengan efisien. Penerapan sistem kogenerasi pada PLTG merupakan salah satu cara agar sistem menjadi lebih efisien. PLTG dengan sistem kogenerasi terdiri dari sistem turbin gas dan HRSG, dimana gas buang yang temperaturnya masih tinggi akan dimanfaatkan lagi. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk meningkatkan performa sistem kogenerasi turbin gas adalah penerapan *evaporative cooling*. Pada *evaporative cooling* udara yang masuk akan didinginkan dengan cara menyemprotkan air pada udara sehingga menurunkan temperatur udara masuk, serta meningkatkan laju aliran massanya. Dengan demikian, kerja bersih yang dihasilkan oleh sistem kogenerasi turbin gas akan meningkat. Dikarenakan hal tersebut, penulis tertarik untuk melakukan penelitian dan modifikasi pada PLTG PT Kilang Pertamina Internasional RU III Plaju Unit UB dimana sistem kogenerasi turbin gas di perusahaan ini belum terdapat *evaporative cooling* sehingga modifikasi akan dilakukan untuk meningkatkan performansi sistem dengan penambahan *evaporative cooling*. Pada penelitian ini, dilakukan kajian performa termodinamika dengan menggunakan metode analisis energi dan juga eksergi terhadap sistem kogenerasi turbin gas sebelum dan sesudah dilakukan modifikasi. Setelah dilakukan pengolahan data didapati bahwa pada sistem saat ini, *combustion chamber* memiliki destruksi eksergi terbesar yaitu sebesar 26153,45 kW, dengan total destruksi eksergi sistem sebesar 40638,30 kW. Pada sistem kondisi modifikasi, *combustion chamber* juga memiliki destruksi eksergi terbesar dengan nilai sebesar 25448,87 kW, dan terdapat penurunan total destruksi eksergi sistem menjadi

40260,49 kW. Komponen dengan efisiensi eksergi terendah pada sistem kondisi saat ini dan modifikasi adalah *combustion chamber* dengan nilai pada sistem saat ini sebesar 63,62% dan pada sistem kondisi modifikasi sebesar 64,86%. Komponen dengan rasio destruksi eksergi tertinggi pada sistem kondisi saat ini dan modifikasi adalah *combustion chamber* dengan rasio sebesar 38,29% pada kondisi saat ini, dan 37,18% pada kondisi modifikasi. Efisiensi sistem kondisi saat ini pada sistem turbin gas sebesar 24,63%, pada HRSG sebesar 79,66%, dan pada sistem kogenerasi sebesar 58,56%. Sedangkan pada sistem kondisi modifikasi, efisiensi sistem turbin gas meningkat sebesar 0,33% menjadi 24,96%, namun HRSG mengalami penurunan sebesar 0,39% menjadi 79,27% dan meskipun begitu, terjadi peningkatan pada sistem kogenerasi sebesar 0,19% menjadi 58,75%. Dari hasil yang didapat, penerapan *evaporative cooling* meningkatkan kerja bersih sistem dari 12667,94 kW menjadi 12866,37 kW yang berarti terdapat peningkatan sebesar 198,43 kW atau sekitar 1,57%. Berdasarkan perbandingan yang telah dilakukan pada sistem kogenerasi turbin gas sebelum dan sesudah modifikasi, penerapan *evaporative cooling* cukup efektif dalam meningkatkan kerja bersih yang dihasilkan.

Kata Kunci : PLTG, pendinginan evaporatif, analisis energi dan eksergi, destruksi eksergi, kogenerasi

Kepustakaan : 20 (1985-2022)

SUMMARY

ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF GAS TURBINE COGENERATION SYSTEMS WITHOUT AND WITH EVAPORATIVE COOLING

Scientific Writing in the form of Thesis, 11 October 2023

Rico Natanael Susetyo;

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

Analisis Energi dan Eksergi Sistem Kogenerasi Turbin Gas tanpa dan dengan Evaporative Cooling

xxxii + 81 pages, 39 figures, 7 tables, 7 attachments

The need for electrical energy has become a basic need in human life today. An energy source is needed to produce electrical energy. Of the many energy sources, fossil fuels such as natural gas are still an option in an effort to satisfy the needs of electrical energy. The availability of fossil fuels is a concern because the amount is limited and can be depleted at any time. Because of that, the utilization of energy resources must be done efficiently. The application of a cogeneration system in gas power plant is one way to make the system more efficient. Gas power plants with a cogeneration system consists of a gas turbine system and HRSG, where exhaust gasses with high temperatures will be used again. One way that can be done to improve the performance of gas turbine cogeneration systems is the application of evaporative cooling. In evaporative cooling, the incoming air will be cooled by spraying water on the air to reduce the temperature of the incoming air, and increase the mass flow rate. Thus, the net power produced by the gas turbine cogeneration system will increase. Because of that, the author is interested in conducting research and modifications to the gas turbine cogeneration systems Unit UB at PT Kilang Pertamina Internasional RU III Plaju where the gas turbine cogeneration system in this company does not yet have evaporative cooling so that the modification will improve system performance with the addition of evaporative cooling. In this study, thermodynamic performance studies were carried out using energy analysis methods and also exergy of the gas turbine cogeneration system before and after modification. After data processing, it was found that in the current system, the combustion chamber has the largest exergy destruction of 26153,45 kW, with a total system exergy destruction of 40638,30 kW. In the modified system, combustion chamber also has the largest exergy destruction with a value of 25448,87 kW, and there was a decrease in total system exergy destruction to 40260,49 kW. The component with the lowest exergy efficiency in the current and modified system is the combustion chamber with a value in the current system of 63,62% and in the

modified system of 64,86%. The component with the highest exergy destruction ratio in the current and modified system is the combustion chamber with a ratio of 38,29% in current conditions, and 37,18% in modified system. In the current system, the gas turbine system efficiency is 24,63%, in HRSG is 79,66%, and in the cogeneration system is 58,56%. While in the modified system, the efficiency of the gas turbine system increased by 0,33% to 24,96%, but in the HRSG efficiency decreased by 0,39% to 79,27% and even so, there was an increase in the cogeneration system by 0,19% to 58,75%. From the results obtained, the application of evaporative cooling increased the net power of the system from 12667,94 kW to 12866,37 kW which means an increase of 198,43 kW or 1,57%. Based on comparisons that have been made on gas turbine cogeneration systems before and after modification, the application of evaporative cooling is quite effective in increasing the net power produced.

Keywords : gas power plant, evaporative cooling, energy and exergy analysis, exergy destruction, cogeneration

Citations : 20 (1985-2022)

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 Kajian Pustaka.....	5
2.2 Siklus Turbin Gas.....	7
2.2.1 Turbin Gas Siklus Terbuka.....	7
2.2.2 Turbin Gas Siklus Tertutup.....	8
2.2.3 Metode Pendinginan pada Turbin Gas.....	10
2.2.3.1 Turbin Gas dengan <i>Mechanical Refrigeration</i>	10
2.2.3.2 Turbin Gas dengan <i>Absorption Cooling</i>	11
2.2.3.3 Turbin Gas dengan <i>Evaporative Cooling</i>	11
2.3 Sistem Kogenerasi Turbin Gas.....	14
2.4 <i>Heat Recovery Steam Generator</i>	15

2.5	Analisis Termodinamika	16
2.5.1	Analisis Energi	18
2.5.2	Analisis Eksergi	18
2.5.2.1	Analisis Eksergi pada Kompresor	18
2.5.2.2	Analisis Eksergi pada <i>Combustion Chamber</i>	19
2.5.2.3	Analisis Eksergi pada Turbin Gas	20
2.5.2.4	Analisis Eksergi pada <i>Supplementary Burner</i>	20
2.5.2.5	Analisis Eksergi pada <i>Superheater</i>	21
2.5.2.6	Analisis Eksergi pada Evaporator	22
2.5.2.7	Analisis Eksergi pada <i>Economizer</i>	22
2.5.3	Efisiensi Eksergi	23
2.5.4	Rasio Destruksi Eksergi	24
2.6	Efisiensi Sistem	24
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		25
3.1	Diagram Alir Penelitian	25
3.2	Asumsi	26
3.3	Pengumpulan Data	26
3.4	Model Sistem Kogenerasi Turbin Gas pada Kondisi Saat Ini	28
3.5	Model Sistem Kogenerasi Turbin Gas pada Kondisi Modifikasi	29
3.6	Analisis dan Pembahasan	29
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		31
4.1	Data Operasi Sistem Kogenerasi Turbin Gas	31
4.2	Analisis Energi pada Kondisi Saat Ini	31
4.3	Analisis Eksergi pada Kondisi Saat Ini	33
4.3.1	Analisis Eksergi pada Kompresor Kondisi Saat Ini	33
4.3.2	Analisis Eksergi pada <i>Combustion Chamber</i> Kondisi Saat ini	34
4.3.3	Analisis Eksergi pada Turbin Gas Kondisi Saat Ini	36
4.3.4	Analisis Eksergi pada <i>Supplementary Burner</i> Kondisi Saat Ini	37
4.3.5	Analisis Eksergi pada <i>Superheater</i> Kondisi Saat Ini	39
4.3.6	Analisis Eksergi pada Evaporator Kondisi Saat Ini	41
4.3.7	Analisis Eksergi pada <i>Economizer</i> Kondisi Saat Ini	42
4.4	Efisiensi Sistem pada Kondisi Saat ini	44
4.4.1	Efisiensi Isentropik Kompresor	44
4.4.2	Efisiensi Isentropik Turbin Gas	45
4.4.3	Efisiensi Sistem Turbin Gas	46
4.4.4	Efisiensi <i>Heat Recovery Steam Generator</i>	46

4.4.5	Efisiensi Sistem Keseluruhan	47
4.5	Analisis Energi Sistem Kondisi Modifikasi	47
4.5.1	<i>Evaporative Cooler</i>	48
4.5.2	Kompresor pada Kondisi Modifikasi	48
4.6	Analisis Eksergi Sistem Kondisi Modifikasi.....	50
4.6.1	Analisis Eksergi pada Kompresor Kondisi Modifikasi.....	50
4.6.2	Analisis Eksergi pada <i>Combustion Chamber</i> Kondisi Modifikasi.....	52
4.6.3	Analisis Eksergi pada Turbin Gas Kondisi Modifikasi.....	53
4.6.4	Analisis Eksergi pada <i>Supplementary Burner</i> Kondisi Modifikasi.....	55
4.6.5	Analisis Eksergi pada <i>Superheater</i> Kondisi Modifikasi	56
4.6.6	Analisis Eksergi pada Evaporator Kondisi Modifikasi	58
4.6.7	Analisis Eksergi pada <i>Economizer</i> Kondisi Modifikasi	60
4.7	Efisiensi Sistem pada Kondisi Modifikasi.....	62
4.7.1	Efisiensi Isentropik Kompresor Kondisi Modifikasi.....	62
4.7.2	Efisiensi Isentropik Turbin Kondisi Modifikasi.....	63
4.7.3	Efisiensi Sistem Turbin Gas Kondisi Modifikasi	63
4.7.4	Efisiensi <i>Heat Recovery Steam Generator</i> Kondisi Modifikasi.....	63
4.7.5	Efisiensi Sistem Keseluruhan Kondisi Modifikasi.....	63
4.8	Pembahasan	64
4.8.1	Destruksi Eksergi.....	64
4.8.2	Efisiensi Eksergi.....	65
4.8.3	Rasio Destruksi Eksergi terhadap Bahan Bakar	66
4.8.4	Efisiensi Sistem	68
4.8.5	Perbandingan Performansi Kedua Sistem	69
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		71
5.1	Kesimpulan.....	71
5.2	Saran	72
DAFTAR PUSTAKA		73
LAMPIRAN.....		75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Siklus turbin gas terbuka	8
Gambar 2.2 Siklus turbin gas tertutup, dan diagram T-s siklus Brayton ideal	9
Gambar 2.3 Siklus turbin gas dengan <i>mechanical refrigeration</i>	10
Gambar 2.4 Siklus turbin gas dengan <i>absorption cooling</i>	11
Gambar 2.5 Siklus turbin gas dengan <i>evaporative cooling</i>	12
Gambar 2.6 Skema pendingin evaporatif.....	12
Gambar 2.7 Sistem kogenerasi turbin gas.....	14
Gambar 2.8 Heat Recovery Steam Generator (HRSG).....	15
Gambar 2.9 Kontrol volume termodinamika	17
Gambar 2.10 Diagram alir kompresor	18
Gambar 2.11 Diagram alir <i>combustion chamber</i>	19
Gambar 2.12 Diagram alir turbin gas.....	20
Gambar 2.13 Diagram alir <i>supplementary burner</i>	20
Gambar 2.14 Diagram alir <i>superheater</i>	21
Gambar 2.15 Diagram alir evaporator	22
Gambar 2.16 Diagram alir <i>economizer</i>	22
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	25
Gambar 3.2 Diagram alir sistem kogenerasi turbin gas pada kondisi saat ini	28
Gambar 3.3 Diagram alir sistem kogenerasi turbin gas pada kondisi modifikasi. 29	
Gambar 4.1 Diagram T-s sistem kogenerasi turbin gas kondisi <i>existing</i>	32
Gambar 4.2 Diagram Grassman kompresor.....	34
Gambar 4.3 Diagram Grassman <i>combustion chamber</i>	36
Gambar 4.4 Diagram Grassman turbin gas	37
Gambar 4.5 Diagram Grassman <i>supplementary burner</i>	39
Gambar 4.6 Diagram Grassman <i>superheater</i>	40
Gambar 4.7 Diagram Grassman evaporator.....	42
Gambar 4.8 Diagram Grassman <i>economizer</i>	43
Gambar 4.9 Diagram T-s sistem kogenerasi turbin gas kondisi modifikasi	50
Gambar 4.10 Diagram Grassman kompresor kondisi modifikasi	52

Gambar 4.11 Diagram Grassman <i>combustion chamber</i> kondisi modifikasi	53
Gambar 4.12 Diagram Grassman turbin gas kondisi modifikasi.....	55
Gambar 4.13 Diagram Grassman <i>supplementary burner</i> kondisi modifikasi	56
Gambar 4.14 Diagram Grassman <i>superheater</i> kondisi modifikasi	58
Gambar 4.15 Diagram Grassman evaporator kondisi modifikasi	59
Gambar 4.16 Diagram Grassman <i>economizer</i> kondisi modifikasi	61
Gambar 4.17 Grafik perbandingan destruksi eksergi sistem kondisi saat ini dan sistem kondisi modifikasi	64
Gambar 4.18 Grafik perbandingan efisiensi eksergi sistem kondisi saat ini dan sistem kondisi modifikasi	66
Gambar 4.19 Grafik perbandingan rasio destruksi eksergi terhadap bahan bakar sistem kondisi saat ini dan sistem kondisi modifikasi	67
Gambar 4.20 Grafik perbandingan efisiensi sistem kondisi saat ini dan sistem kondisi modifikasi.....	68

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data operasi sistem kogenerasi turbin gas Unit UB PT Kilang Pertamina Internasional RU III Plaju.....	27
Tabel 4.1 Parameter operasi sistem kogenerasi turbin gas	31
Tabel 4.2 Nilai entalpi dan entropi sistem kondisi saat ini	32
Tabel 4.3 Destruksi eksergi, efisiensi eksergi dan rasio destruksi eksergi terhadap bahan bakar sistem kondisi saat ini	44
Tabel 4.4 Nilai entalpi dan entropi sistem kondisi modifikasi.....	49
Tabel 4.5 Destruksi eksergi, efisiensi eksergi dan rasio destruksi eksergi terhadap bahan bakar sistem kondisi modifikasi.....	61
Tabel 4.6 Perbandingan performansi yang dihasilkan sistem kondisi saat ini dan sistem kondisi modifikasi	69

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Tabel A7.1 <i>Ideal Gas Properties of Air</i>	75
Lampiran 2 Tabel B.1.4 <i>Compressed Liquid Water</i>	76
Lampiran 3 Tabel B.1.2 <i>Saturated Water</i>	77
Lampiran 4 Tabel B.1.3 <i>Superheated Vapor Water</i>	78
Lampiran 5 Tabel Psikometri.....	79
Lampiran 6 Konfirmasi Izin Pengambilan Data	80
Lampiran 7 Memorandum Pengambilan Data	81

NOMENKLATUR

Lambang	Keterangan	Satuan
\dot{m}	Laju aliran massa	kg/s
$\dot{E}x$	Laju eksergi	kW
ex	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
ψ	Efisiensi eksergi	%
y	Rasio eksergi terhadap bahan bakar	%
φ	Rasio eksergi gas alam	-
LHV	<i>Low Heating Value</i>	kJ/kg
η	Efisiensi termal	%
 Subskrip		
q	Kalor	
w	Kerja	
D	Destruksi	
i	<i>Inlet</i>	
o	<i>Outlet</i>	
0	Parameter nilai lingkungan	
wb	<i>Wet bulb</i>	
fw	<i>Feed water</i>	
f	<i>Fuel</i>	
u	Udara	
g	Gas	
fg	Flue gas	
a	Air	
bb	Bahan bakar	
ec	<i>Evaporative Cooler</i>	
C	Kompresor	
cc	<i>Combustion chamber</i>	
T	Turbin gas	
sb	<i>Supplementary burner</i>	
sh	<i>Superheater</i>	
eva	Evaporator	
eco	<i>Economizer</i>	
 Superskrip		
0	Kondisi lingkungan	

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kehidupan manusia di zaman yang semakin maju ini, erat kaitannya dengan penggunaan energi listrik. Kehadiran listrik di dalam kehidupan manusia, telah merubah bagaimana manusia melakukan kegiatannya sehari-hari yang sebelumnya dilakukan secara manual, menjadi otomatis dengan bantuan alat yang ditenagai listrik. Sekarang, begitu banyak kegiatan manusia dari yang sederhana hingga yang kompleks seperti perindustrian, memerlukan listrik untuk melakukannya. Terutama pada sektor industri, listrik memainkan peranan penting dalam proses operasi industri, dan hampir mencakup semua aspek yang ada pada industri tersebut. Dengan adanya listrik, terjadi perubahan pada sektor industri proses manufaktur juga produksi bahan dan barang yang diperlukan oleh manusia, menjadi lebih efisien, cepat, dan lebih hemat dibandingkan sebelum adanya listrik. Tentunya untuk dapat menghasilkan listrik, diperlukan sumber energi dan pembangkit listrik.

Bahan bakar fosil masih menjadi pilihan sebagai sumber energi yang digunakan untuk menghasilkan listrik. Namun, jumlah sumber energi ini terbatas dan dapat habis sewaktu-waktu. Hal inilah yang menjadi perhatian para peneliti, untuk mengembangkan berbagai metode dan cara yang efektif agar sumber energi tersebut dapat dimanfaatkan secara maksimal. Dengan menerapkan cara yang lebih efektif dalam mengolah sumber energi menjadi listrik, secara tidak langsung biaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan listrik berkurang. Begitu juga dengan emisi yang dihasilkan oleh pembangkit listrik, dimana emisi yang dihasilkan oleh pembangkit listrik yang lebih efisien dan optimal akan berkurang sehingga lebih ramah lingkungan.

Dalam upaya memenuhi kebutuhan energi listrik bagi masyarakat atau industri, diperlukan suatu pembangkit listrik dan PLTG merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang masih sering digunakan. PLTG menggunakan bahan bakar

gas alam, dimana gas alam ini merupakan bahan bakar fosil. PLTG masih banyak digunakan karena harga bahan bakarnya yang termasuk murah dan melimpah, emisi yang lebih rendah dibandingkan pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil lainnya. Meskipun begitu, terdapat suatu permasalahan dimana gas buang dari hasil pembakaran pembangkit listrik ini, dibuang langsung ke atmosfer. Dimana gas buang tersebut seharusnya dimanfaatkan terlebih dahulu, dikarenakan temperatur gas buang yang keluar dari turbin gas tersebut masih sangat tinggi.

Sistem kogenerasi merupakan salah satu usaha pemanfaatan dari gas buangan turbin gas tersebut. Dengan penerapan sistem kogenerasi ini, akan menghasilkan dua produk berharga yaitu energi listrik dan energi termal, dari satu input bahan bakar. Gas buang akan disalurkan ke HRSG atau *Heat Recovery Steam Generator*, dimana terjadi perpindahan panas dari gas buang ke air. Air yang mendapat energi termal dari gas buang akan berubah menjadi uap. Uap inilah yang dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan energi termal pada suatu pabrik. Dilakukannya penerapan sistem kogenerasi pada turbin gas ini akan meningkatkan efisiensi dari turbin gas, dan sekaligus memenuhi kebutuhan energi termal pada suatu perusahaan, yang otomatis akan membuat penghematan biaya dalam upaya menghasilkan energi listrik dan termal.

Kemampuan dan efisiensi dari sebuah sistem turbin gas, dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti temperatur ambien dan laju aliran massa. Pada jurnal yang berjudul "*Two-Stage Evaporative Inlet Air Gas Turbine Cooling*" yang ditulis oleh Obida Zeitoun, menyebutkan bahwa kemampuan dari turbin gas dapat turun hingga 20% di daerah dengan iklim panas, seperti pada Saudi Arabia. Adapun hal ini disebabkan oleh penurunan laju massa udara pada turbin, yang diakibatkan oleh kenaikan temperatur ambien (Zeitoun, O., 2021).

Pendinginan pada inlet sistem dapat dilakukan sebagai upaya untuk meningkatkan kerja keluaran yang dihasilkan oleh sistem turbin gas. *Evaporative cooling*, *mechanical refrigeration*, dan *absorption cooling* merupakan beberapa contoh metode pendinginan udara yang masuk ke sistem turbin gas. Dengan metode pendinginan ini, maka kerja yang dihasilkan sistem turbin gas akan meningkat dengan menurunnya temperatur udara masuk kompresor serta naiknya laju aliran massa udara (Santos, 2012).

Evaporative cooling merupakan salah satu metode pendinginan pada sistem gas turbin yang sering digunakan. Instalasi yang cukup mudah, serta biaya instalasi serta pengoperasiannya yang tergolong murah membuat metode ini dipilih untuk menjadi opsi yang digunakan pada sistem turbin gas. Pada *evaporative cooling*, udara akan didinginkan menggunakan air yang disemprotkan ke media pendingin sehingga ketika melewati media pendingin, kalor di udara akan berpindah ke air. (Carmona, 2015).

Berdasarkan dari studi literatur yang telah dilakukan, penulis berkeinginan melakukan penelitian dan modifikasi terhadap sistem kogenerasi turbin gas dengan penambahan *evaporative cooling*. Penulis melakukan studi kasus pada sistem kogenerasi turbin gas PT Kilang Pertamina Internasional RU III Plaju, dimana dari data yang telah didapat, terdapat peluang dilakukan sebuah modifikasi dengan menambahkan *evaporative cooling* untuk meningkatkan kinerja sistem tersebut. Kajian termodinamika terhadap kinerja sistem kogenerasi turbin gas milik PT Kilang Pertamina Internasional RU III Plaju kondisi saat ini dan kondisi modifikasi dilakukan menggunakan analisis energi, serta analisis eksergi.

1.2 Rumusan Masalah

Performa dari sebuah sistem turbin gas, dipengaruhi oleh temperatur dan laju aliran massa. Dimana, semakin tinggi temperatur ambien pada suatu sistem turbin gas, maka semakin rendah pula daya yang dihasilkan sistem oleh tersebut. Hal ini dikarenakan temperatur ambien yang tinggi akan membuat laju aliran massa udara berkurang, sehingga daya yang dihasilkan ikut berkurang. Penurunan temperatur dapat dilakukan dengan penerapan pendinginan evaporatif yang akan mendinginkan udara sebelum masuk ke kompresor, sehingga kerja keluaran yang dihasilkan oleh sistem turbin gas meningkat. Dikarenakan hal tersebut, penulis ingin melakukan sebuah kajian pada peningkatan performansi sistem kogenerasi turbin gas dengan penerapan *evaporative cooling* menggunakan metode analisis energi dan eksergi.

1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, penulis berfokus melakukan kajian kinerja termodinamika pada sistem kogenerasi turbin gas tanpa dan dengan *evaporative cooling*, menggunakan analisis energi dan eksergi. Penulis melakukan kajian pada sistem kogenerasi turbin gas di PT Kilang Pertamina Internasional RU III Plaju. Diasumsikan kondisi lingkungan memiliki temperatur sebesar 32 °C, tekanan 1 atm.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan analisis energi dan eksergi pada sistem kogenerasi turbin gas sebelum dan sesudah dilakukan modifikasi dengan penambahan *evaporative cooling*, kemudian dilakukan komparasi pada performansi yang dihasilkan sistem kogenerasi turbin gas kondisi saat ini dan kondisi modifikasi.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang didapatkan dalam penelitian ini adalah sebagai referensi ilmiah baik bagi peneliti maupun pihak PT Kilang Pertamina Internasional RU III Plaju terhadap peningkatan performansi sistem kogenerasi turbin gas dengan penerapan *evaporative cooling*.

DAFTAR PUSTAKA

- Aliu, S. A., dan Ochornma, P. I. (2018) “Comparative Energy and Exergy Analysis of a Thermal Power Plant With/Without Retrofitted Inlet Air Cooler: A Case Study”. *European Journal of Engineering Research and Science*, 3(6), 1. <https://doi.org/10.24018/ejers.2018.3.6.757>
- Basri, H. dan Santoso, D. (2010) “Analisis Eksergi Pada Siklus Turbin Gas Sederhana 14 Mw Instalasi Pembangkit Tenaga Keramasan Palembang”, Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin IX 2010.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G. dan Moran, M. (1996) *Thermal design and optimization*, Energy. doi: 10.1016/s0360-5442(96)90000-6.
- Bhatia, S.C. (2014) *Advanced Renewable Energy Systems*, (Part 1 and 2). WPI Publishing, New Delhi. <https://doi.org/10.1201/b18242>
- Borgnakke, C. dan Sonntag, R. E. (2013) *Fundamental of Thermodynamics 8th*. 8th ed. Diedit oleh L. Ratts. Don Fowley.
- Boyce, Meherwan P. (2012) *Gas Turbine Engineering Fourth Edition*. Butterworth-Heinemann.
- Carmona, J. (2015) “Gas Turbine Evaporative Cooling Evaluation for Lagos – Nigeria”. *Applied Thermal Engineering*. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.06.018.
- Cengel, Y. A. dan Boles, M. A. (2006) *Thermodynamics An Engineering Approach*.
- Direk, M., dan Mert, M. S. (2018). “Comparative and exergetic study of a gas turbine system with inlet air cooling”. *Tehnicki Vjesnik*, 25, 306–311. <https://doi.org/10.17559/TV-20160811162110>
- Fallah, M., dkk. (2016) “Comparison of different gas turbine cycles and advanced exergy analysis of the most effective”. *Energy*, 116, 701–715. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.10.009>
- Haouam, A., Derbal, C., dan Mzad, H. (2019) “Thermal performance of a gas turbine based on an exergy analysis”. *E3S Web of Conferences*, 128. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912801027>
- Ibrahim, T. K., dkk. (2017) “Thermal performance of gas turbine power plant based on exergy analysis”. *Applied Thermal Engineering*, 115, 977–985. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.032>

- Kotas, T.J. (1985) *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Butterworths, London, Boston.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D. dan Bailey, M. B. (2014) *Fundamentals of Engineering Thermodynamics 8th*, Don Fowley. doi: 10.1007/978-94-009-9929-9_3.
- Ntor, E., & Abioye, A. (2022) "Performance of Gas Turbine Power Plant with Evaporative Air Pre-Cooler System Using Energy and Exergy Concept." *International Journal Applied Technology Research*, 3(2), 66-80. <https://doi.org/10.35313/ijatr.v3i2.106>
- Ozkan, D. B., Kiziler, O. dan Bilge, D. (2012) "Exergy Analysis of a Cogeneration Plant" *International Journal of Mechanical and Aerospace Engineering*.
- Santos, A. P. dan Andrade, C. R. (2012). "Analysis of gas turbine performance with inlet air cooling techniques applied to Brazilian sites". *Journal of Aerospace Technology and Management*, 4(3), 341–353. <https://doi.org/10.5028/jatm.2012.04032012>
- Shanbghazani, M., Khalilarya, Sh., dan Mirzaee, I. (2008) "Exergy Analysis of a Gas Turbine System with Evaporative Cooling at Compressor Inlet", *Int. J. Exergy*, Vol. 5, No. 3, pp.309–325.
- Sue, D.C. dan Chuang, C.C. (2004) "Engineering design and exergy analyses for combustion gas turbine based power generation system", *Energy*, Vol. 29, pp.1183–1205.
- Zeitoun, O. (2021) "Two-Stage Evaporative Inlet Air Gas Turbine Cooling" *Energies* 2021, 14, 1382. <https://doi.org/10.3390/en14051382>.