

**ANALISIS EKSERGI DAN OPTIMASI PLTP PT. PERTAMINA
GEOHERMAL ENERGY AREA KAMOJANG
SIKLUS *DIRECT-DRY STEAM***

SKRIPSI



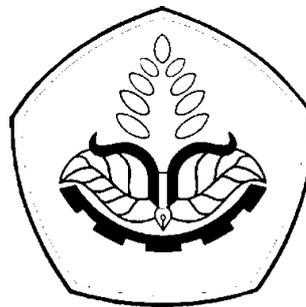
Oleh

**Mochammad Syahrul Birri
NIM H41160679**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ENERGI TERBARUKAN
JURUSAN TEKNIK
POLITEKNIK NEGERI JEMBER
2020**

**ANALISIS EKSERGI DAN OPTIMASI PLTP PT. PERTAMINA
GEOHERMAL ENERGY AREA KAMOJANG
SIKLUS *DIRECT-DRY STEAM***

SKRIPSI



Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan Teknik
(S. Tr. T) di Program Studi Teknik Energi Terbarukan Jurusan Teknik

Oleh

**Mochammad Syahrul Birri
NIM H41160679**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ENERGI TERBARUKAN
JURUSAN TEKNIK
POLITEKNIK NEGERI JEMBER
2020**

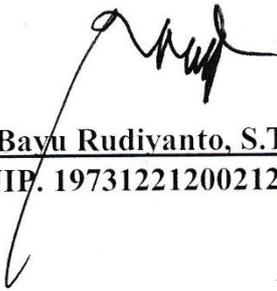
KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN

POLITEKNIK NEGERI JEMBER

**ANALISIS EKSERGI DAN OPTIMASI PLTP PT. PERTAMINA
GEOHERMAL ENERGY AREA KAMOJANG
SIKLUS *DIRECT-DRY STEAM***

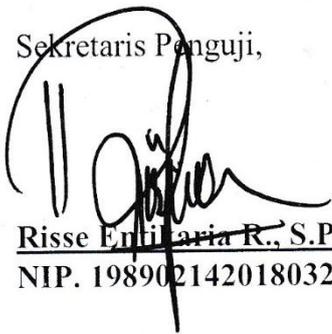
Diuji pada tanggal : 04 September 2020
Dan dinyatakan **LULUS**

Ketua Penguji,



Dr. Bayu Rudivanto, S.T., M.Si.
NIP. 197312212002121001

Sekretaris Penguji,



Risse Enil Laria R., S.Pd, M.Si
NIP. 198902142018032002

Anggota Penguji,



Siti Diah Ayu Febriani, S.Si, M.Si.
NIP. 199102202015102001

Menyetujui,
Ketua Jurusan Teknik



Moelhammad Nuruddin, S.T., M.Si.
NIP. 197611112001121001

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Mochammad Syahrul Birri

NIM : H41160679

menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa segala pernyataan dalam Skripsi saya yang berjudul “Analisis Eksergi dan Optimasi PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Siklus *Direct-Dry Steam*” merupakan gagasan dan hasil karya saya sendiri dengan arahan komisi pembimbing, dan belum pernah diajukan dalam bentuk apa pun pada perguruan tinggi mana pun.

Semua data dan informasi yang digunakan telah dinyatakan secara jelas dan dapat diperiksa kebenarannya. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam naskah dan dicantumkan dalam daftar pustaka di bagian akhir Laporan Skripsi ini.

Jember, 04 September 2020



Mochammad Syahrul Birri
NIM. H41160679



**SURAT PERNYATAAN
PERSETUJUAN PUBLIKASI
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Yang bertandatangan di bawahini, saya:

Nama : Mochammad Syahrul Birri
NIM : H41160679
Program Studi : Teknik Energi Terbarukan
Jurusan : Teknik

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada UPT. Perpustakaan Politeknik Negeri Jember, Hak Bebas Royalti Non-Eklusif (*Non-Exclusive Royalt Free Right*) atas karya ilmiah **berupa Laporan Skripsi saya yang berjudul:**

**“Analisis Eksergi dan Optimasi PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy
Area Kamojang Siklus *Direct-Dry Steam*”**

Dengan hak bebas royalti Non-Eklusif ini UPT. Perpustakaan Politeknik Negeri Jember berhak menyimpan, mengalih media atau format, mengelola dalam bentuk Pangkalan Data (database), mendistribusikan karya dan menampilkan atau mempublikasikannya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis tanpa perlu meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis atau pencipta.

Saya bersedia untuk menanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Politeknik Negeri Jember, Segala bentuk tuntutan hukum yang timbul atas Pelanggaran Hak Cipta dalam Karya Ilmiah ini.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jember
Pada Tanggal : 04 September 2020
Yang menyatakan,



Mochammad Syahrul Birri

MOTTO

“وَإِنْ تَعُدُّوا نِعْمَةَ اللَّهِ لَا تُحْصُوهَا ... (النحل : ١٨)”

“Dadi opo wae ning dunyo sakarepmu, tapi ilingo awakmu bakale mati
– (Habib Hadi Pasuruan)”

“Jangan Pernah Takut Berkarya – (RioPurba.ID)”

“If You Think You Can Do It, You Can! – (Moch. Syahrul Birri)”

PERSEMBAHAN

Karya Tulis Ilmiah ini saya persembahkan kepada :

1. Kedua orang tua saya tercinta Bapak Mukhlason dan Ibu Mariyam, terimakasih atas kasih sayang dan cintanya, dukungan baik moril maupun materil, segala motivasi yang telah diberikan sehingga tidak ada kata menyerah dalam menempuh kuliah dan menyelesaikan Tugas Ilmiah ini. Terimakasih atas segala pengorbanan yang tiada tara dan perjuangan yang tidak kenal kata menyerah, yang tidak akan pernah dapat terbalaskan oleh putramu ini.
2. Para staf pengajar Politeknik Negeri Jember khususnya Program Studi Teknik Energi Terbarukan yang telah memberikan wawasan ilmu dan pengetahuan serta nasehat-nasehat yang bermanfaat bagi penulis.
3. Almamater tercinta Politeknik Negeri Jember

**ANALISIS EKSERGI DAN OPTIMASI PLTP PT. PERTAMINA
GEOHERMAL ENERGY AREA KAMOJANG
SIKLUS *DIRECT-DRY STEAM***

Dr. Bayu Rudiyanto, S.T, M.Si sebagai dosen pembimbing

Mochammad Syahrul Birri

Program Studi Teknik Energi Terbarukan

Jurusan Teknik

Politeknik Negeri Jember

Sahrul.birri@gmail.com

ABSTRAK

Analisis energi dan eksergi pada PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4 siklus *direct-dry steam* dilakukan pada setiap komponen dan *state* sehingga dapat diketahui laju energi dan eksergi serta letak terjadinya irreversibilitas komponen. Nilai irreversibilitas terbesar terjadi pada *turbine* dan *main condensore* dengan nilai masing-masing 21693,890 kW dan 21688,148 kW. Total irreversibilitas dari semua sistem yaitu 58326,201 kW sedangkan total eksergi masuk sistem sebesar 119308,457 kW, sehingga didapat nilai efisiensi eksergi *overall* sebesar 51,11%. Berdasarkan analisis *environment as dead state*, nilai efisiensi eksergi berbanding terbalik dengan nilai irreversibilitas seiring dengan meningkatnya suhu lingkungan. Optimasi pada sistem dilakukan dengan menggunakan metode *genetic algorithm* dengan variabel nilai tekanan *wellhead* dan *inlet turbin* terhadap nilai efisiensi eksergi *overall*. Nilai yang didapat dari optimasi tersebut yaitu 11,98 bar pada *wellhead* dan 10,023 bar pada *inlet turbine* sehingga nilai efisiensi eksergi *overall* meningkat sebesar 51,22%.

Kata Kunci : Eksergi, Irreversibilitas, Efisiensi eksergi

**EXERGY ANALYSIS AND OPTIMATION PLTP PT. PERTAMINA
GEOTHERMAL ENERGY AREA KAMOJANG
DIRECT-DRY STEAM CYCLE**

Dr. Bayu Rudiyanto, S.T, M.Si as counselor

Mochammad Syahrul Birri

Study Program of Renewable Energy Engineering

Department of Engineering

State Polytechnic of Jember

Sahrul.birri@gmail.com

ABSTRACT

Energy and exergy analysis at PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4 direct-dry steam cycle was done on each component and state, so that known energy and exergy stream and where it happened irreversibility at component. The biggest irreversibility value was happened at turbine and main condensore with respectively value is 21693.890 kW and 21688.148 kW. Total irreversibility off all systems is 58326.201 kW while total exergy inlet systems is 119308.457 kW, so that the value efficiency exergy overall obtained is 51.11%. Based on environment as dead state analysis, an efficiency exergy value is inversely proportional with irreversibility value along with ascending environment temperature. An optimization at systems was done with genetic algorithm method, with variable value at pressure wellhead and inlet turbin for efficiency exergy overall value. The value obtained from optimization is 11.98 bar at wellhead and 10.023 bar at inlet turbine, so efficiency exergy overall value increased by 51.22%.

Keywords: *Exergy, Irreversibility, Efficiency Exergy*

RINGKASAN

Analisis Eksergi dan Optimasi PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Siklus *Direct-Dry Steam*, Mochammad Syahrul Birri, NIM H41160679, Tahun 2020, 59 halaman, Teknik, Politeknik Negeri Jember, Dr. Bayu Rudiyanto, S.T., M.Si. (Pembimbing)

Selama 37 tahun beroperasi, PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang telah beroperasi untuk memproduksi listrik hingga saat ini mampu menyuplai dan mendistribusikan listrik pada daerah Jawa-Bali dengan kapasitas sebesar 60 MWe. Tentunya terjadi penurunan efisiensi serta efektivitas kinerja sistem akibat terjadinya kehilangan energi (*energy losses*) pada beberapa komponen PLTP pada saat konversi energi.

Metode analisis eksergi serta optimasi bertujuan untuk mengetahui laju energi maupun eksergi serta letak terjadinya *losses* pada komponen PLTP sehingga dilakukan optimasi untuk meningkatkan kinerja sistem. Pada penelitian ini analisis eksergi dilakukan pada setiap komponen maupun *state* pada sistem PLTP sehingga akan didapat nilai efisiensi eksergi keseluruhan sistem.

Berdasarkan analisis dan perhitungan yang dilakukan, didapat nilai laju eksergi masuk pada sistem yaitu sebesar 119308,457 kW dengan total eksergi keluar sebesar 58326.201 kW. Eksergi keluar sistem merupakan jumlah eksergi yang dimusnahkan pada setiap komponen PLTP. Eksergi yang dimusnahkan tersebut merupakan keadaan suatu sistem tidak dapat kembali ke awal proses atau yang disebut irreversibilitas. Nilai irreversibilitas terbesar pada penelitian ini terjadi pada komponen *turbine* dan *main condensore*, nilai irreversibilitas pada komponen tersebut masing-masing sebesar 21693,890 kW untuk *turbine* dan 21688,148 kW untuk *main condensore*. Hal tersebut dikarenakan proses ekspansi yang terjadi pada *turbine* karena adanya gesekan antara uap dan sudu *turbine* serta perpindahan panas yang berlebih pada *main condensore* akibat proses kondensasi uap.

Nilai efisiensi eksergi *overall* berdasarkan perhitungan analisis eksergi pada penelitian ini yaitu sebesar 51,11% dari total eksergi masuk sistem, artinya hanya

60982,256 kW yang dapat diekstraksi menjadi listrik. Berdasarkan analisis *environment as dead state*, diperoleh bahwa nilai efisiensi eksergi berbanding terbalik dengan nilai irreversibilitas seiring dengan meningkatnya suhu lingkungan.

Optimasi dilakukan dengan menggunakan metode *genetic algorithm* dengan variabel nilai tekanan *wellhead* dan *inlet turbin* yang berpengaruh pada nilai efisiensi eksergi *overall*. Berdasarkan simulasi yang dilakukan, didapat nilai tekanan pada *wellhead* sebesar 11,98 bar pada *constraint* 11-13 bar serta tekanan pada *inlet turbin* sebesar 10,023 bar pada *constraint* 10-11,5 bar sehingga berpengaruh terhadap efisiensi eksergi *overall* pada sistem mengalami kenaikan sebesar 0,11% dari nilai 51,11% menjadi 51,22%.

PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi yang berjudul “Analisis Eksergi dan Optimasi PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Siklus *Direct-Dry Steam*”.

Tulisan ini merupakan laporan hasil penelitian sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains Terapan (S.Tr.T) di Program Studi Teknik Energi Terbarukan, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Jember. Banyak pihak yang telah memberikan bantuan baik moril maupun materil dalam penyusunan laporan skripsi ini, oleh karena itu penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Direktur Politeknik Negeri Jember, Bpk. Saiful Anwar, S.TP., M.P;
2. Bpk. Mochammad Nuruddin, S.T., M.Si selaku Ketua Jurusan Teknik;
3. Bpk. Yuli Hananto, S.TP., M.Si selaku Ketua Program Studi Teknik Energi Terbarukan;
4. Bpk. Dr. Bayu Rudiyanto, S.T., M.Si selaku dosen pembimbing yang dengan sabar memberi bimbingan, masukan, dan saran selama pengerjaan laporan skripsi ini;
5. Ibu Risse Entikaria Rachmanita, S.Pd., M.Si selaku dosen pengji 1;
6. Ibu Siti Diah Ayu Febriani, S.Si., M.Si selaku dosen penguji 2;
7. Bpk. Mukhamad Nashir selaku pembimbing lapang di perusahaan dalam penelitian ini;
8. Bpk. Mukhlason dan Ibu Maryam beserta keluarga besarku tercinta yang selalu memberi do'a, dukungan maupun finansial serta semangat;
9. Kakak Alfiah Rohmawati, S.S dan M. Iqbal, S.Kom yang selalu memberi semangat serta kritik dan saran;
10. Saudari Amalia Dwi Nofianti, S.Tr.P selaku teman dekat yang selalu memberi saran, dukungan, serta hiburan;
11. Teman seperjuangan mahasiswa D-IV Teknik Energi Terbarukan serta semua pihak yang telah membantu pelaksanaan maupun penulisan laporan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa laporan skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan, oleh karena itu penulis mengharapkan masukan dan kritikan yang membangun dan dapat bermanfaat bagi Politeknik Negeri Jember maupun bagi pembaca lainnya.

Jember, 04 September 2020

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
SURAT PERNYATAAN	iv
SURAT PERNYATAAN PUBLIKASI	v
MOTTO	vi
PERSEMBAHAN	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
RINGKASAN	x
PRAKATA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Energi Panas Bumi	5
2.2 PLTP dan Jenis Siklus PLTP	6
2.2.1 Siklus Uap Kering (<i>Direct-dry Steam</i>)	7
2.2.2 Siklus Uap Hasil Pemisahan (<i>Separated-Steam</i>)	7
2.2.3 Siklus Uap Hasil Penguapan (<i>Single-Flash Steam</i>)	8

2.2.4	Siklus Uap Hasil Pemisahan dan Penguapan (<i>Double-Flash Steam</i>)	9
2.2.5	Siklus Uap Hasil Pemisahan dan Penguapan dengan Dua Turbin Terpisah (<i>Flashing Multi-Flash Steam</i>)	9
2.3	PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang	10
2.3.1	Sejarah Singkat PT. PGE Area Kamojang	10
2.3.2	Potensi dan Produksi PT. PGE Area Kamojang	12
2.3.3	Diagram Skema PLTP PT. PGE Area Komjang	13
2.4	Termodinamika Dasar	14
2.4.1	Sistem Termodinamika Dasar	14
2.4.2	Properti Termodinamika	15
2.4.3	Proses-proses dalam Termodinamika	15
2.5	Hukum Termodinamika	16
2.5.1	Reversibel dan Irreversibel	17
2.5.2	Proses Konversi Energi dalam Termodinamika	17
2.5.3	Kesetimbangan Energi, Eksergi dan Entropi	19
2.6	Analisis Eksergi	20
2.6.1	Konsep Dasar Eksergi	21
2.6.2	Komponen Eksergi	22
2.6.3	Keadaan Mati (<i>dead state</i>)	24
2.7	Optimasi dengan Metode <i>Genetic Algorithm</i>	25
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN		28
3.1	Lokasi dan Waktu Pelaksanaan	28
3.2	Metode Penelitian	28
3.3	Tahapan Penelitian	28
3.3.1	Survei Lapang	28
3.3.2	Diagram Skema Sistem dan Parameter Pengamatan	29
3.3.3	Pengumpulan Data	31
3.3.4	Pengolahan Data	32
3.4	Diagram Alir Penelitian	35

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Analisis Nilai Energi dan Eksergi PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4	37
4.1.1 Analisis Nilai Energi Sistem PLTP	41
4.1.2 Analisis Nilai Eksergi Sistem PLTP	43
4.1.3 Analisis Efisiensi Eksergi <i>Overall</i>	50
4.2 Analisis <i>Environment as Dead State</i>	51
4.3 Optimasi Tekanan <i>Wellhead</i> dan <i>Inlet Turbine</i> dengan Metode <i>Genetic Algorithm</i>	53
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	56
5.1 Kesimpulan	56
5.2 Saran	56
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN	59

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Klasifikasi sistem panas bumi berdasarkan suhu	6
Tabel 2.2 Klasifikasi sistem panas bumi berdasarkan Hochstein (1990)	6
Tabel 3.1 Laju Energi Tiap Komponen	33
Tabel 3.2 Irreversibilitas tiap Komponen	34
Tabel 3.3 Kondisi lingkungan Daerah Kamojang	34
Tabel 4.1 Data pada setiap <i>state</i>	37
Tabel 4.2 Hasil simulasi dan perhitungan laju energi dan eksergi	38
Tabel 4.3 Laju Energi tiap Komponen	41
Tabel 4.4 Laju Eksergi tiap Komponen	44
Tabel 4.5 Data hasil optimasi	55

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Skema Instalasi <i>Direct-Dry Steam</i>	7
Gambar 2.2 Skema Instalasi <i>Separated-Steam</i>	8
Gambar 2.3 Skema Instalasi <i>Single-Flash Steam</i>	8
Gambar 2.4 Skema Instalasi <i>Double-Flash Steam</i>	9
Gambar 2.5 Skema Instalasi <i>Multi-Flash Steam</i>	10
Gambar 2.6 Peta Lokasi Sumur Area Kamojang	12
Gambar 2.7 Diagram Skema PLTP PT. PGE Area Kamojang Unit 4	13
Gambar 2.8 Ilustrasi sistem, lingkungan, dan batas	14
Gambar 2.9 Diagram <i>T-s Direct Dry Steam</i>	18
Gambar 2.10 Ilustrasi Aliran Energi, Eksergi dan Entropi	20
Gambar 2.11 Ilustrasi sistem berinteraksi dengan lingkungan	21
Gambar 2.12 Tahapan logika dalam <i>genetic algorithm</i>	66
Gambar 3.1 Sistem PLTP Jenis Multi-Flash Steam di PT. PGE Area Kamojang ..	29
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian	36
Gambar 4.1 <i>T-s diagrams</i> proses konversi energi	40
Gambar 4.2 Grafik Nilai Irreversibilitas tiap Komponen	44
Gambar 4.3 Nilai Efisiensi Eksergetik tiap Komponen	49
Gambar 4.4 <i>Grassmann Diagrams exergy flow</i> PLTP PT. PGE Kamojang Unit 4..	51
Gambar 4.5 Analisis <i>Environment as Dead State</i>	52
Gambar 4.6 Optimasi dengan 20 kali iterasi	53
Gambar 4.7 Optimasi dengan 50 kali iterasi	54
Gambar 4.8 Optimasi dengan 100 kali iterasi	54

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Simulasi software Engineering Equation Solver	59
Lampiran 2. Simulasi software Google Colabs	61
Lampiran 3. Script Genetic Algorithm	62
Lampiran 4. Perhitungan Turbine	66
Lampiran 5. Tabel Perhitungan Exergy flow Diagram Grassmann	67

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pertumbuhan penduduk serta ekonomi di Indonesia yang semakin meningkat menyebabkan meningkatnya pula jumlah kebutuhan energi yang digunakan. Berdasarkan HEESI (*Handbook of Energy and Economic Statistic of Indonesia*) pada data Kementerian ESDM dalam bukunya Outlook Energy Indonesia (2019) menunjukkan produksi pembangkit listrik di Indonesia mencapai 283,3 TWh, sebagian besar produksi tersebut dihasilkan dari pembangkit listrik yaitu 56,4% berbahan bakar batubara, 20,2% berbahan bakar gas, 6,3% BBM, dan sisanya berasal dari EBT. Energi Baru Terbarukan dapat membantu untuk mencapai target produksi tersebut yang salah satunya yaitu panas bumi. Menurut Ditjen EBTKE (2018) total potensi panas bumi di Indonesia yaitu mencapai 28,5 GW (Kementerian ESDM, diolah kembali oleh DEN, 2019).

Sejak tahun 1982, PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang telah beroperasi untuk memproduksi listrik hingga saat ini mampu menyuplai dan mendistribusikan listrik pada daerah Jawa-Bali dengan kapasitas sebesar 60 MWe. Peningkatan daya yang dibangkitkan tersebut untuk kebutuhan di daerah yang cukup meluas dari tahun ke tahun, sedangkan karakteristik sumur produksi setiap tahun memiliki penurunan kualitas yang dihasilkan oleh sumur, maka terjadi kecenderungan penurunan pada kualitas *steam* (Balqis dkk, 2012).

PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang pada prinsipnya menggunakan siklus *direct-dry steam*. Saptadji (2012) mengemukakan bahwa siklus *direct-dry steam* ini pada prinsipnya apabila fluida di kepala sumur berupa fasa uap, maka uap tersebut dapat dialirkan langsung menuju turbin. Turbin mengkonversi energi panas menjadi energi mekanik, sehingga turbin menggerakkan generator dan menghasilkan energi listrik.

Selama 37 tahun beroperasi, pada komponen-komponen pembangkit seperti generator, turbin, kondensor dan *cooling tower* juga mengalami penurunan efisiensi serta efektifitas kinerja sehingga akan mengakibatkan banyak terjadinya kerugian (*losses*) pada beberapa komponen PLTP pada proses konversi energi. Akibat

adanya *losses* tersebut maka dari itu penurunan efisiensi tersebut dapat dianalisis menggunakan metode analisis eksergi untuk meningkatkan efisiensi dan efektifitas kinerja sistem.

Metode analisis eksergi merupakan metode penyelesaian analisis kesetimbangan energi dengan konsep eksergi yang didasari oleh Hukum I dan II Termodinamika. Metode analisis eksergi tersebut dapat digunakan untuk menunjukkan letak kehilangan energi dalam proses yang dapat menyebabkan penurunan operasi atau kinerja sistem pada sebuah sistem pembangkit daya (Anwar dkk, 2013).

Rudiyanto, dkk (2017) dalam penelitiannya studi kasus panas bumi di PT Indonesia Power Area Kamojang menggunakan metode analisis eksergi menjelaskan bahwa pada kapasitas panas bumi 55 MW yang didominasi reservoir dengan suhu 245°C, didapatkan hasil efisiensi keseluruhan sistem yaitu 35,86% yang berarti hanya 111.138,92 kW yang dapat diekstraksi dari total eksergi 309.000 kW yang diproduksi oleh 10 sumur produksi di Kamojang. Efisiensi yang rendah tersebut terjadi karena irreversibilitas terbesar yang terjadi pada komponen kondensor karena 53% dari total energi dibuang ke lingkungan.

Metode optimasi yang digunakan pada penelitian ini yaitu menggunakan metode *genetic algorithm*. Adhitya, 2017 dalam penelitiannya optimasi sistem PLTP siklus *single-flash* menggunakan metode *genetic algorithm* meliputi hubungan antara variabel tekanan pada tekanan *wellhead* dan tekanan pada *separator* dengan nilai efisiensi eksergi *overall*. Nilai tekanan variabel yang didapat yaitu 12,56 bar pada *wellhead* dan 11,42 bar pada *separator* dengan nilai *constraint* masing-masing sebesar 12-14 bar pada *wellhead* dan 8,5-12 bar pada *separator*, sehingga didapat nilai optimasi pada efisiensi eksergi *overall* sebesar 24,3% yang memiliki kenaikan 0,35% dari efisiensi sebelumnya sebesar 23,95%.

Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis eksergi dan optimasi pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) PT. Pertamina Geothermal Energi Area Kamojang Siklus *Direct-Dry Steam*. Kajian dari penelitian ini dilakukan sebagai bentuk evaluasi kinerja pada sistem pembangkit saat proses konversi energi dan juga sebagai identifikasi komponen yang memiliki *losses*

terbesar, sehingga dapat digunakan untuk mengacu dalam menentukan langkah-langkah optimalisasi peningkatan kinerja pada sistem PLTP.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini antara lain :

- a. Bagaimana analisis energi dan eksergi pada sistem PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang?
- b. Bagaimana analisis pengaruh suhu lingkungan terhadap efisiensi eksergetik dan pemusnahan eksergi sistem PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang?
- c. Bagaimana optimasi nilai tekanan pada *wellhead* dan inlet *turbine* terhadap efisiensi eksergetik pada PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Menganalisis energi dan eksergi pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang
- b. Menganalisis pengaruh suhu lingkungan terhadap efisiensi eksergetik dan pemusnahan eksergi dalam sistem PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang
- c. Melakukan optimasi nilai tekanan pada *wellhead* dan inlet *turbine* terhadap efisiensi eksergetik pada PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat yaitu sebagai sumber informasi dan rujukan bagi para akademisi maupun praktisi yang akan melakukan kajian analisis energi dan eksergi sebagai upaya meningkatkan efisiensi pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi. Manfaat lainnya yaitu untuk PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang adalah sebagai sumber informasi

mengenai besar, letak dan penyebab terjadinya *losses* eksergi pada sistem PLTP dan juga upaya-upaya yang dapat ditempuh untuk memperbaiki sistem tersebut, sehingga dengan perbaikan sistem ini dapat meningkatkan performa sistem PLTP serta memberikan keuntungan dari aspek finansial dan mempertahankan reabilitas dari sistem PLTP itu sendiri.

1.5. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini yang merupakan asumsi umum dari keadaan PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang yaitu :

1. Penelitian dilakukan pada PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4 dengan kapasitas pembangkitan 60 MW;
2. Penelitian difokuskan pada analisis energi dan eksergi dari sistem PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4;
3. Sistem dan subsistem diasumsikan beroperasi tanpa memperhitungkan kerugian panas;
4. Nilai NCG (*Non Condensable Gas*) diasumsikan kurang dari 1%;
5. Diasumsikan tidak ada kebocoran pada sistem;
6. Hanya membahas tentang eksergi fisik;
7. Sifat properti lingkungan di lingkungan panas bumi diasumsikan sama dengan air murni.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Energi Panas Bumi

Energi panas bumi merupakan energi karena panas yang dihasilkan secara berkelanjutan dari dalam perut bumi, dimana panas dibentuk pada inti bumi dengan kedalaman kira-kira 4.000 mil dibawah permukaan tanah. Suhu lebih panas dari pada panas permukaan matahari, secara terus menerus diproduksi melalui teknik peluruhan radioaktif secara perlahan dan proses ini terjadi dalam semua lapisan batuan. Sebagian besar sumberdaya energi panas bumi tersimpan dalam bentuk : Gunung api, fumarol (lubang dimana gas vulkanik lepas), Sumber air panas, dan Geiser. Panas Bumi adalah sumber energi panas yang terkandung di dalam air panas, uap air, dan batuan bersama mineral ikutan dan gas lainnya yang tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem Panas Bumi dan untuk pemanfaatannya diperlukan proses penambangan. (PGE, 2012).

Sistem panas bumi di Indonesia umumnya merupakan sistem *hydrothermal* yang mempunyai temperatur tinggi ($>225^{\circ}\text{C}$), hanya beberapa di antaranya yang mempunyai temperatur sedang ($150-225^{\circ}\text{C}$). Pada dasarnya sistem panas bumi jenis *hydrothermal* terbentuk sebagai hasil perpindahan panas dari suatu sumber panas ke sekelilingnya yang terjadi secara konduksi dan secara konveksi. Perpindahan panas secara konduksi terjadi melalui batuan, sedangkan perpindahan panas secara konveksi terjadi karena adanya kontak antar air dengan satu sumber panas. Perpindahan panas secara konveksi pada dasarnya terjadi karena gaya apung (Saptadji, 2013).

Sistem panas bumi dapat diklasifikasikan berdasarkan suhunya seperti pada Tabel 2.1. Suhu reservoir panasbumi biasanya berkisar 100 s.d. 350°C . Beberapa ahli panas bumi mengklasifikasikan sistem panas bumi berdasarkan suhu menjadi tiga kategori suhu rendah, suhu sedang dan suhu tinggi.

Tabel 2.1. Klasifikasi sistem panas bumi berdasarkan suhu

Klasifikasi	Muffer & Cataldi (1978)	Haenel, Rybach & Stegna (1988)	Benderiter & Cormy (1990)
Suhu rendah	< 90 °C	< 150 °C	<100 °C
Suhu sedang	90 – 150 °C	-	100 – 200 °C
Suhu tinggi	>150 °C	>250 °C	>200 °C

Namun, pada akhirnya yang lebih populer dipakai adalah klasifikasi Hochstein (1990), seperti pada Table 2.2.

Tabel 2.2. Klasifikasi sistem panas bumi berdasarkan Hochstein (1990)

Klasifikasi	Hochstein (1990)
Suhu rendah	< 125 °C
Suhu sedang	125 – 225 °C
Suhu tinggi	>225 °C

2.2. PLTP dan Jenis Siklus PLTP

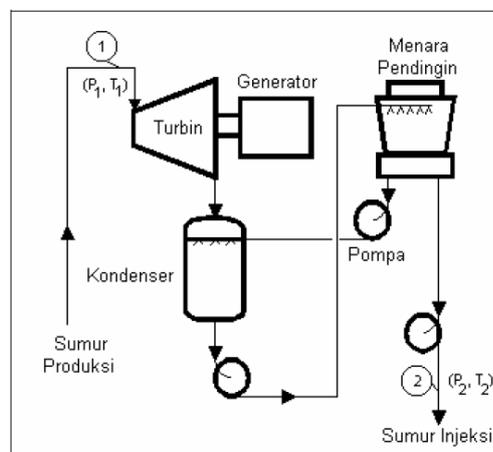
Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) merupakan suatu pembangkit listrik yang memanfaatkan fluida panas bumi yang mengandung energi panas kemudian dikonversi menjadi energi listrik.

Pada prinsipnya PLTP hampir sama dengan prinsip kerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), hanya saja pada PLTU uap dibuat dipermukaan menggunakan boiler, sedangkan PLTP uap berasal dari reservoir panas bumi. Apabila fluida di kepala sumur berupa fasa uap, maka uap tersebut dialirkan langsung ke turbin, kemudian turbin akan mengubah energi panas menjadi energi gerak yang akan memutar generator sehingga pada generator mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Apabila fluida panas bumi keluar dari kepala sumur sebagai campuran fluida dua fasa (uap dan cair) maka fluida tersebut terlebih dahulu dilakukan proses pemisahan. Hal ini dilakukan dengan melewati fluida ke dalam separator, sehingga fasa uap akan terpisahkan dari fasa cairnya. Fasa uap yang dihasilkan dari separator inilah yang kemudian dialirkan menuju turbin. (Saptadji, 2012).

Beberapa sistem pembangkit listrik dari fluida panas bumi yang telah diterapkan di lapangan, diantaranya: *Direct-dry steam*, *Separated Steam*, *Single-flash steam*, *Double-flash steam*, dan *Multi-flash steam*.

2.2.1. Siklus Uap Kering (*Direct-dry Steam*)

Fluida uap kering merupakan sistem konversi yang paling sederhana dan paling murah. Uap yang berasal dari turbin dapat langsung dibuang ke atmosfer (*atmospheric exhaust turbine*). Pada kondensor, kondensat yang dihasilkan dialirkan menuju *cooling tower* dan selanjutnya diinjeksikan kembali ke bawah permukaan. Sebagian dari kondensat yang sudah dilewatkan *cooling tower* dialirkan kembali ke kondensor. Pembangkit listrik yang menggunakan sistem *atmospheric exhaust turbine* ini dapat mengkonsumsi sekitar dua kali (dalam tekanan inlet yang sama) lebih banyak untuk setiap kilowatt keluaran, sehingga banyak energi dan biaya yang terbuang.

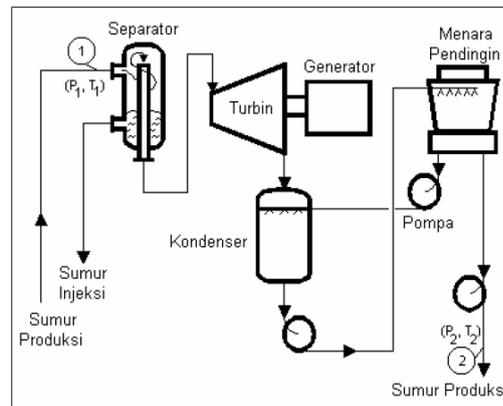


Gambar 2.1 Skema Instalasi *Direct-Dry Steam* (Saptadji, 2012)

2.2.2. Siklus Uap Hasil Pemisahan (*Separated-Steam*)

Pada siklus ini terjadi karena fluida yang didapat dari kepala sumur memiliki 2 fasa (fasa cair dan uap) sehingga terlebih dahulu dilakukan proses pemisahan pada fluida. Pemisahan fluida 2 fasa tersebut dilakukan dengan meleatkan fluida ke dalam separator, sehingga didapatkan fasa uap yang kemudian

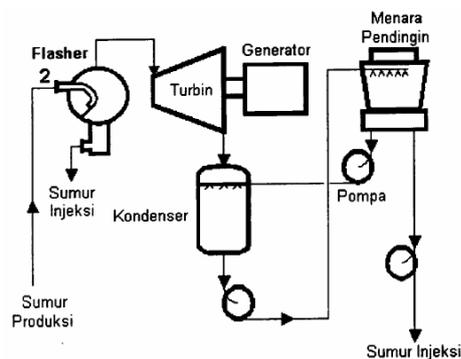
dialirkan ke turbin dan fasa airnya diinjeksikan kembali ke bawah permukaan. Oleh karena uap yang digunakan pada turbin adalah uap hasil pemisahan, maka sistem ini dinamakan siklus uap hasil pemisahan.



Gambar 2.2 Skema Instalasi *Separated-Steam* (Saptadji, 2012)

2.2.3 Siklus Uap Hasil Penguapan (*Single-Flash Steam*)

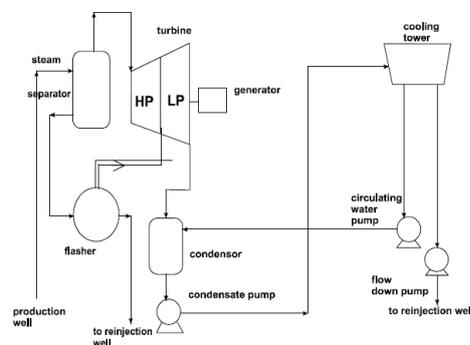
Sistem ini digunakan apabila fluida di kepala sumur dalam kondisi cair-jenuh (*saturated-liquid*). Sistem ini dilengkapi dengan sebuah *flasher* yang berfungsi untuk menguapkan fluida. Banyaknya uap yang dihasilkan tergantung dari tekanan *flasher*. Uap yang dihasilkan dari *flasher* kemudian dialirkan ke turbin.



Gambar 2.3 Skema Instalasi *Single-Flash Steam* (Saptadji, 2012)

2.2.4. Siklus Uap Hasil Pemisahan dan Penguapan (*Double-Flash Steam*)

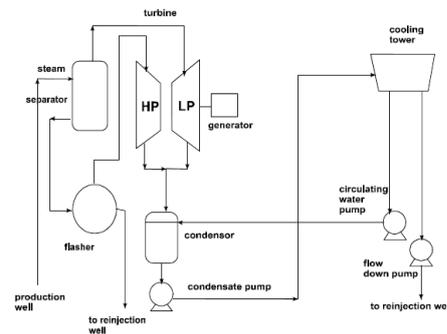
Pada sistem ini digunakan 2 pemisahan fluida secara bertahap yaitu separator dan *flasher* dan juga digunakan komposisi 2 turbin yaitu *High-Pressure Turbine* dan *Low-Pressure Turbine* yang disusun secara tandem (ganda). Dimana fluida uap yang dihasilkan dari separator dialirkan ke *High-Pressure Turbine* dan fluida airnya dialirkan ke *flasher* untuk diupkan kemudian hasil penguapannya dialirkan ke *Low-Pressure Turbine*.



Gambar 2.4 Skema Instalasi *Double-Flash Steam* (Saptadji, 2012)

2.2.5. Siklus Uap Hasil Pemisahan dan Penguapan dengan Dua Turbin Terpisah (*Flashing Multi-Flash Steam*)

Pada sistem ini hampir sama dengan sistem *Double-Flash Steam*, hanya saja pada kedua turbin yang berbeda tekanan disusun secara terpisah. Uap dengan tekanan dan temperatur tinggi yang mengandung air dipisahkan di separator agar diperoleh uap kering yang digunakan untuk menggerakkan *High-Pressure Turbine*. Sedangkan air hasil pemisahan pada separator dengan tekanan dan temperatur rendah dialirkan ke *flasher* agar menghasilkan uap. Uap yang dihasilkan dari *flasher* dialirkan ke *Low-Pressure Turbine* sementara uap sisanya dibawa ke kondensor untuk diubah menjadi fasa cair.



Gambar 2.5 Skema Instalasi *Multi-Flash Steam* (Saptadji, 2012)

2.3. PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang

2.3.1. Sejarah Singkat PT. PGE Area Kamojang

PGE merupakan salah satu anak perusahaan PT. Pertamina (Persero) dengan PT. Pertamina Dana Ventura. Perusahaan ini bergerak di bidang pemanfaatan energi panas bumi. Perusahaan mempunyai peran penting bagi masyarakat dalam berkontribusi sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan terbarukan khususnya di Indonesia. Pemanfaatan energi panas bumi telah dilakukan sejak tahun 1980an.

Sejak tahun 1974 Pertamina telah melakukan kegiatan eksplorasi dan eksploitasi dengan mengidentifikasi sebanyak 70 wilayah panas bumi dengan temperatur tinggi yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik. Wilayah tersebut tersebar di seluruh Indonesia antara lain Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, Maluku, dan Sulawesi. Upaya ini menunjukkan keberhasilan dengan diresmikannya lapangan Kamojang di daerah Jawa Barat pada tanggal 29 Januari 1983. Energi panas bumi lapangan tersebut digunakan untuk menggerakkan PLTP Kamojang Unit 1 dengan kapasitas pembangkitan sebesar 30 MW. Di pulau Sumatera untuk pertama kali beroperasi PLTP Monoblok 2 MW di daerah Sibayak-Brastagi. Pada 2004, PLTP pertama di Sulawesi dengan kapasitas 20 MW beroperasi di daerah Lahendong.

Kegiatan eksplorasi untuk mengetahui keberadaan energi panas bumi di Kamojang dimulai pada tahun 1926-1928 oleh Pemerintah Belanda dengan pengeboran dangkal pada kedalaman 120 meter. Pada tahun 1971-1972 dilakukan

studi kelayakan dengan kerja sama antara *Geothermal Survey of Indonesia (GSI)* dan *New Zealand Geothermal Project*. Selanjutnya dilakukan penyelidikan geologi, geofisika, dan geokimia sampai dengan tahun 1974, kerja sama antara Pertamina dengan ENEX-GSI.

Melalui Keppres RI Nomor 16 tahun 1974, Pertamina diberi kuasa melakukan pengelolaan panas bumi di Indonesia. Pengeboran pertama Pertamina bekerja sama dengan pemerintah New Zealand dilakukan pada tanggal 22 September 1974 dan sampai dengan tahun 1979, telah diselesaikan pengeboran lima buah sumur eksplorasi dan sepuluh buah sumur pengembangan.

Pada tanggal 27 November 1978, diresmikan pemakaian monoblok 250 KW oleh Menteri Pertambangan waktu itu, Prof. Dr. Subroto. Tanggal 29 Januari 1983, Kamojang ditetapkan sebagai lapangan produksi panas bumi pertama di Indonesia, menyusul kemudian diresmikannya PLTP Unit 1 berkapasitas 30 Mwe yang dioperasikan PT. PLN oleh Presiden Republik Indonesia dan Perdana Menteri Selandia Baru. Tanggal ini ditetapkan sebagai titik awal beroperasinya lapangan panas bumi Kamojang Uap yang digunakan untuk memutar turbin PLTP 30 Mwe tersebut berasal dari jalur PL-401 yang pendanaannya berasal dari hibah pemerintah Selandia Baru dalam rangka pengembangan energi panas bumi di Indonesia.

Pengeboran sumur pengembangan selanjutnya diarahkan kepada upaya untuk memenuhi kebutuhan uap total 1100 ton/jam untuk dipasok ke PLTP Unit 2 dan Unit 3 yang masing-masing berkapasitas 55 Mwe yang dioperasikan oleh PT Indonesia Power. Persiapan tersebut selesai pada tahun 1989 dan pada tanggal 2 Februari 1988 diresmikan pengoperasian Unit 2 dan Unit 3 oleh Presiden Indonesia. Pada kurun waktu 1989-1996 dilakukan persiapan pemanfaatan uap panas bumi untuk peningkatan kapasitas menjadi 200 Mwe. Peningkatan tersebut direalisasikan dengan dibangunnya PLTP Unit 4 yang berkapasitas 60 Mwe oleh PT. Pertamina Geothermal Energy dan diresmikan oleh Presiden Republik Indonesia pada tanggal 11 Desember 2007 dan komersial pada 26 Januari 2008.

Lokasi sumur yang tersebar di Area Kamojang ditunjukkan pada Gambar 2.6 sebagai berikut.



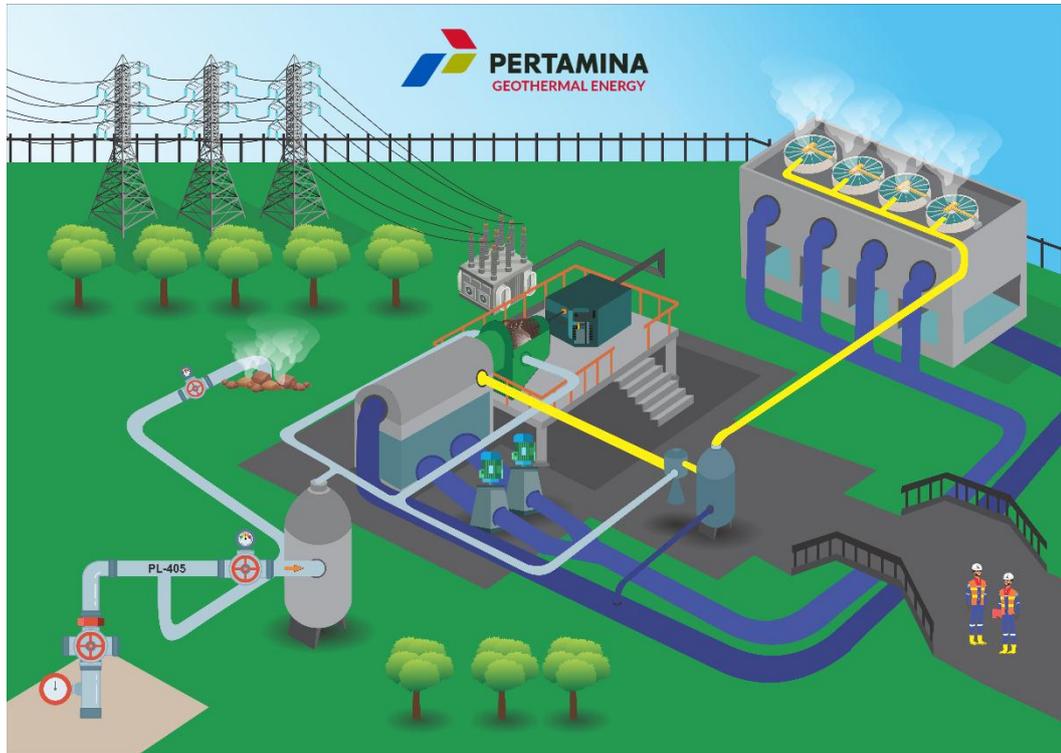
Gambar 2.6 Peta Lokasi Sumur Area Kamojang

2.3.2. Potensi dan Produksi PT. PGE Area Kamojang

Area Kamojang yang pertama kali beroperasi pada tahun 1982 ini memiliki kapasitas total PLTP sebesar 230 Mwe. PT. Pertamina Geothermal Energy mensuplai uap untuk PLTP Unit I, II, dan III ke PT. Indonesia Power dengan total kapasitas terpasang 140 Mwe serta PLTP unit 4 dan 5 milik PT. Pertamina Geothermal Energy dengan kapasitas masing-masing 60 MWe dan 30 Mwe. Jumlah pemakaian uap yang digunakan untuk membangkitkan listrik sebesar 140 Mwe PLTP Unit 1, 2, 3 membutuhkan uap sebanyak 1100 ton/jam atau 18,3 ton tiap 1 MWh sedangkan untuk membangkitkan listrik sebesar 60 Mwe PLTP Unit 4 membutuhkan uap sebanyak 410 ton/jam atau 6,9 ton tiap MWh.

Reservoir di Kamojang memiliki karakteristik yaitu memiliki sistem dominasi uap dengan suhu 230-250°C, tekanan 30-34 bar dan jenis fluida saturated. Kualitas uap yang dibutuhkan turbin memiliki water content kurang dari 1% dan TDS kurang dari 8 ppm. Uap yang mengarah ke turbin mengandung silika kurang dari 1 pp, dan NCG (*Non Condensable Gas*) kurang dari 1% . Di Area Kamojang terdapat 4 buah pipe line II-4 (PL) uap yaitu PL 401, 402, 403, dan 404 yang dialirkan ke PLTP Unit 1, 2, 3 dan PL 405 yang dialirkan ke PLTP Unit 4.

2.3.3. Diagram Skema PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Komjang
Berikut merupakan skema rinci PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4 yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Diagram Skema PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4

PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4 memproduksi listrik sebesar 60MW. Sumber energi untuk membangkitkan daya tersebut diperoleh dari sumur produksi. Sumur uap panas bumi yang digunakan yaitu sebanyak 14 sumur dengan pembagian beberapa *cluster*. Sumur yang digunakan yaitu didominasi uap sekitar 98% sehingga digunakan siklus pada PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang yaitu siklus *direct-dry steam*.

Fluida yang keluar dari sumur-sumur produksi yang didominasi uap terakumulasi pada *Steam Header* kemudian dialirkan ke *Scrubber* untuk memisahkan kandungan air. Uap keluaran dari *scrubber* dialirkan menuju turbin dan sebagian kecil menuju *rock muffler* yang berfungsi untuk membuang uap ketika turbin membutuhkan jumlah uap berlebih atau beban tegangan naik. Uap yang masuk ke turbin berfungsi untuk mengubah energi panas dari uap menjadi energi

gerak pada turbin sehingga dapat menggerakkan generator yang dapat menghasilkan listrik. Uap sisa dari turbin dialirkan ke kondensor untuk diubah fasanya menjadi cair.

Kondensor memiliki ruang kosong yang digunakan untuk menampung gas yang tidak bias keluar sehingga gas tersebut diinjeksikan ke sebuah alat yaitu *ejector*. *Ejector* berfungsi untuk menghisap gas yang ada pada kondensor untuk menghilangkan NCG dan gas berbahaya kemudian dialirkan menuju *cooling tower*. Air yang keluar dari kondensor dialirkan ke *cooling tower* untuk diturunkan temperaturnya sehingga dapat digunakan kembali pada kondensor. Hasil kondensasi penggunaan uap akan diinjeksikan kembali ke dalam bumi.

2.4. Termodinamika Dasar

2.4.1. Sistem Termodinamika Dasar

Menurut Cengel *and* Boles (2015), Sistem (*system*) didefinisikan sebagai kuantitas materi di dalam ruang yang akan dipelajari. Sedangkan materi di luar sistem disebut juga sebagai lingkungan (*surrounding*), dan permukaan yang memisahkan antara sistem dengan lingkungan disebut sebagai batas (*boundary*). Gambar 2.8 menunjukkan ilustrasi sistem, lingkungan, dan batas.



Gambar 2.8 Ilustrasi sistem, lingkungan, dan batas (Cengel *and* Boles, 2015)

Suatu sistem dianggap terbuka atau tertutup tergantung tergantung ketika sistem memiliki massa atau volume yang tetap (Cengel *and* Boles, 2015). Dua jenis sistem termodinamika diantaranya sebagai berikut ini.

- a. Sistem tertutup (*closed system*), sistem dengan jumlah materi yang sama atau tetap (*control mass*) dimana perpindahan massa tidak dapat melewati batas sistem (*boundary*). Namun, energi dalam bentuk panas dan kerja dapat

melewati batas sistem (*boundary*). Sementara, secara khusus terdapat sistem tertutup tetapi tidak dapat berinteraksi dengan lingkungan, sistem ini disebut dengan sistem terisolasi (*isolated system*).

- b. Sistem terbuka (*open system*), sistem ini memungkinkan terjadi perpindahan massa melewati batas sistem (*boundary*). Pada sistem ini hanya mengatur volume materi masuk sehingga disebut juga volume atur (*control volume*). Perpindahan materi melewati batas bersamaan dengan perpindahan energi ke dalam sistem.

2.4.2. Properti Termodinamika

Menurut Cengel *and* Boles (2015), Sifat (*property*) merupakan karakteristik dari suatu sistem. Entalpi dan entropi merupakan *property* dasar untuk menjelaskan karakteristik dalam termodinamika. Berikut ini penjelasan dari entalpi dan entropi.

- a. Entalpi merupakan *property* termodinamika yang menyatakan jumlah energi dari suatu sistem. Total entalpi tidak bisa diukur secara langsung, namun perubahannya dapat diketahui. Satuan Internasional (SI) entalpi adalah Joule (J).
- b. Entropi merupakan *property* termodinamika yang menyatakan jumlah energi per satuan temperatur yang tidak melakukan kerja. Entropi dapat menggambarkan bahwa energi selalu mengalir secara spontan dari temperatur tinggi ke temperatur rendah. Satuan Internasional (SI) entalpi adalah Joule per Kelvin (J/K).

2.4.3. Proses-proses dalam Termodinamika

Proses merupakan perubahan yang dialami oleh suatu sistem dari keadaan yang seimbang menuju keadaan lain (Cengel *and* Boles, 2015). Dilihat dari fenomena suatu *property*, macam-macam proses di dalam termodinamika diantaranya sebagai berikut :

- a. Proses isobarik, proses dengan tekanan awal sama dengan tekanan akhir proses atau dapat dikatakan tekanan konstan.
- b. Proses isokhorik, proses dengan volume awal sama dengan volume akhir proses atau dapat dikatakan volume konstan.

- c. Proses isothermal, proses dengan temperatur awal sama dengan temperatur akhir proses atau dapat dikatakan temperatur konstan.
- d. Proses isentropik, proses yang tidak ada kalor masuk atau keluar sistem serta tidak ada gesekan maupun hambatan (tidak terjadi perubahan entropi) atau proses ini dapat dikatakan adiabatik reversibel.

2.5. Hukum Termodinamika

Hukum termodinamika dapat dijadikan dasar untuk menganalisis konversi eksergi pada PLTP. Sebagaimana hukum pertama termodinamika mengatakan bahwa energi yang dihasilkan suatu mesin dalam bentuk usaha mekanik, akan sama dengan selisih antara energi yang diserap dan yang terbuang dalam bentuk panas. Hukum pertama termodinamika dapat ditulis dalam persamaan berikut (Cengel and Boles, 2015) :

$$Q = -W \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan memperhatikan bahwa :

1. Semua besaran harus dinyatakan dalam besaran yang sama
2. Q positif apabila panas masuk ke dalam system
3. W positif apabila gaya dilakukan oleh sistem dan perpindahan mempunyai tanda yang sama

Persamaan diatas menjelaskan bahwa perubahan energi dari keadaan 1 menuju keadaan 2 pada suatu lintasan tertentu adalah selisih antara Q, energi yang diberikan kepada sistem oleh pemidahan panas (dalam satuan panas) dengan W, energi yang terambil dari sistem oleh kerja usaha (dalam satuan mekanik). Jika pada suatu sistem terdapat proses dimana energi kembali pada keadaan awal (proses siklus reversible) maka :

$$Q = W \dots\dots\dots(2.2)$$

Suatu sistem yang terisolasi adalah sistem yang tidak melakukan usaha luar dan tidak ada panas yang mengalir kedalamnya. Maka pada proses tersebut $Q = W$ atau $\Delta U = 0$, yang berarti energi dalam suatu sistem yang terisolasi tetap konstan seperti yang mengacu pada asas kekekalan energi.

Hukum kedua termodinamika mengatakan “Tidak mungkin ada sebuah proses yang hasilnya hanya menyerap panas dari reservoir pada satu suhu dan mengubah seluruh panas ini menjadi usaha mekanik”. Hukum kedua termodinamika juga menegaskan bahwa energy memiliki kualitas serta kuantitas (Cengel *and* Boles, 2015).

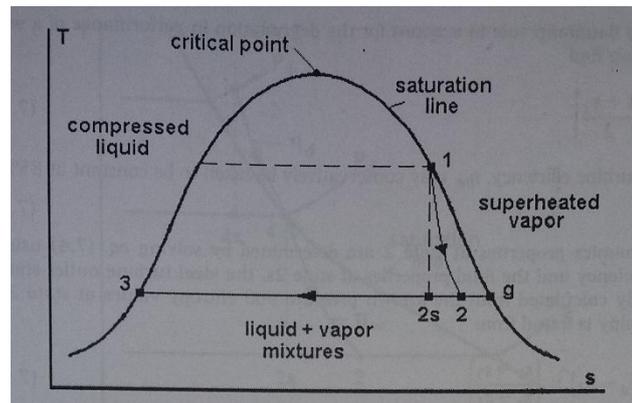
2.5.1. Reversibel dan Irreversibel

Proses reversibel didefinisikan sebagai proses yang dapat dibalik tanpa meninggalkan jejak di sekitarnya. Artinya, sistem dapat dikembalikan semula seperti pada keadaan awal proses. Terdapat dua jenis proses reversibel yaitu reversibel internal dan reversibel eksternal. Reversibel internal terjadi jika tidak ada irreversibilitas di dalam sistem selama proses tersebut, sedangkan reversibel eksternal terjadi jika tidak ada irreversibilitas diluar sistem selama proses tersebut.

Sedangkan, proses ireversibel adalah proses yang tidak dapat dibalik, artinya sistem tidak dapat dikembalikan semula seperti keadaan awal proses. Hal ini disebabkan karena ketidakmampuan balik atau irreversibilitas. Irreversibilitas dipengaruhi oleh gesekan, ekspansi tak terkendali, pencampuran dua cairan, perpindahan panas yang melintasi perbedaan suhu yang terbatas, hambatan listrik, deformasi inelastis zat padat, dan reaksi kimia (Cengel *and* Boles, 2015).

2.5.2. Proses Konversi Energi dalam Termodinamika

Proses konversi energi pada PLTP dari *steam* hingga menjadi energi listrik melalui beberapa tahap. Di bawah ini merupakan gambar dari diagram $T-s$ yang menunjukkan beberapa proses yang dialami oleh fluida. (DiPippo, 2012)



Gambar 2.9 Diagram T - s *Direct Dry Steam* (DiPippo, 2012)

Fluida yang digunakan pada poses *direct-dry steam* merupakan fluida uap kering (superheated vapor) sehingga proses diagram T - s dimulai dari turbin.

a. *Turbine Expansion Process*

Pada proses ini fluida dengan fasa uap kering masuk ke dalam turbin untuk melakukan kerja (point 1). Kerja yang dihasilkan oleh turbin per unit massa pada fluida yang mengalir dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$W_t = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) \dots\dots\dots(2.3)$$

Diasumsikan sebagai proses adiabatik dan mengabaikan perubahan energi dalam kinetic dan potensial dari fluida yang masuk dan keluar dari turbin. Kerja maksimum yang akan dihasilkan jika turbin beroperasi secara adiabatik reversible yaitu pada entropi konstan atau disebut isentropis.

Efisiensi turbin isentropis, η_t , adalah perbandingan antara kerja aktual dan kerja isentropis:

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \dots\dots\dots(2.4)$$

dimana:

h_1 = entalpi masuk turbin aktual (kJ/kg)

h_2 = entalpi keluar turbin aktual (kJ/kg)

h_{2s} = entalpi keluar turbin ideal (kJ/kg)

Entalpi keluar turbin pada kondisi ideal dan aktual dapat ditentukan menggunakan persamaan *Baumann Rule* yaitu:

$$h_{2s} = h_3 + [h_g - h_3] \cdot \left[\frac{s_1 - s_3}{s_g - s_3} \right] \dots\dots\dots(2.5)$$

$$h_2 = \frac{h_1 - A \left[\frac{h_3}{h_g - h_3} \right]}{1 + \frac{A}{h_g - h_3}} \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana:

faktor $A = 0.425 (h_1 - h_{2s})$

$h_3 = h_f$ = entalpi keluar turbin kondisi cair (kJ/kg)

h_g = entalpi keluar turbin kondisi uap (kJ/kg)

s_1 = entropi masuk turbin (kJ/kg.K)

$s_3 = s_f$ = entropi keluar turbin kondisi cair (kJ/kg.K)

s_g = entropi keluar turbin kondisi uap (kJ/kg.K)

Daya yang dibangkitkan oleh turbin yaitu:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_s \cdot w_t = \dot{m}_s (h_1 - h_2) = \dot{m}_s \cdot \eta_t (h_1 - h_2) \dots\dots\dots(2.7)$$

Daya listrik kotor (\dot{W}_{output}) sama dengan daya turbin dikali dengan efisiensi generator (kW):

$$\dot{W}_{\text{output}} = \eta_g \cdot \dot{W}_t \dots\dots\dots(2.8)$$

Daya bersih adalah jumlah daya listrik kotor dikurangi oleh semua komponen beban termasuk daya pompa kondensat, daya *fan cooling tower*, dan penerangan.

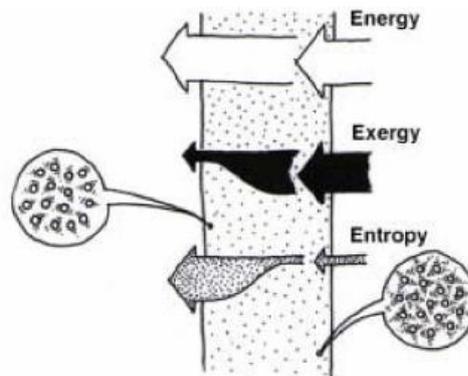
b. *Condensing Process*

Proses kondensasi terjadi pada kondensor, dimana fasa uap keluaran turbin (point 2) dikondensasikan menjadi fasa cair dengan bantuan air pendingin dari *cooling tower* sehingga point 2 ke point 3 merupakan proses kondensasi.

2.5.3. Kestimbangan Energi, Eksergi dan Entropi

Energi merupakan kemampuan untuk melakukan kerja, yaitu memindahkan suatu benda dengan gaya N dan jarak tertentu (m) sehingga menghasilkan gerak. Energi terdiri atas eksergi dan entropi. Eksergi merupakan kualitas energi yang digunakan untuk melakukan kerja, sedangkan entropi merupakan bagian dari energi yang mengalami perubahan wujud dan tidak melakukan kerja. Berdasarkan hukum termodinamika pertama, energi dan massa yang masuk kedalam sebuah sistem

sebagai kerja akan sama dengan energi yang keluar sistem pada kondisi seimbang (*steady state steady flow*) (Rudiyanto, 2008).



Gambar 2.10 Ilustrasi Aliran Energi, Eksergi dan Entropi

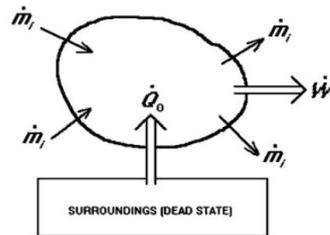
Gambar 2.10 menjelaskan bahwa energi yang masuk kedalam sistem sama dengan energi yang keluar sistem pada kondisi *steady*. Menurut hukum peningkatan entropi, entropi yang masuk kedalam sistem lebih kecil daripada entropi yang keluar dari sistem karena entropi yang keluar sistem akan bertambah seiring dengan adanya degradasi entalpi. Pada bagian eksergi, akan selalu ada eksergi yang hilang atau keluar sistem yang dikenal dengan pemusnahan eksergi yang dikonsumsi oleh peningkatan entropi.

2.6. Analisis Eksergi

Eksergi merupakan energi yang dapat dimanfaatkan (*available energy*) atau ukuran ketersediaan energi untuk melakukan kerja teoritik maksimum yang dapat diperoleh hingga sistem tersebut mencapai kesetimbangan dengan lingkungannya (Moran dan Saphiro, 2006). Analisis eksergi adalah alat untuk identifikasi jenis, lokasi dan besarnya kerugian termal. Identifikasi dan kualifikasi kerugian ini memungkinkan untuk evaluasi dan desain sistem termal.

2.6.1. Konsep Dasar Eksergi

Penurunan persamaan untuk memperoleh nilai eksergi spesifik dari suatu aliran fluida dapat dimulai dengan ilustrasi sistem yang berinteraksi dengan lingkungan pada Gambar 2.11



Gambar 2.11 Ilustrasi sistem berinteraksi dengan lingkungan

Sistem yang diilustrasikan merupakan sistem terbuka dan *steady* dengan mengabaikan energi potensial dan kinetik, terdapat satu masukan dan satu keluaran, Q_0 merupakan energi lingkungan yang diberikan ke sistem dan W menunjukkan hasil kerja dari sistem, maka keseimbangan energi ditulis :

$$Q - \dot{W} = \dot{m} (h_2 - h_1) \dots\dots\dots(2.9)$$

Karena perpindahan panas yang terjadi hanya antara sistem dengan lingkungannya, maka persamaan (2.12) dapat diubah menjadi:

$$Q_0 - \dot{W} = \dot{m} (h_2 - h_1) \dots\dots\dots(2.10)$$

$$-\dot{m} (s_2 - s_1) - Q_0 / T_0 = 0 \dots\dots\dots(2.11)$$

Substitusi dari kedua persamaan (2.13) dan (2.14) di atas, diperoleh:

$$\dot{W} = \dot{m} ((h_1 - h_2) - T_0 (s_1 - s_2)) \dots\dots\dots(2.12)$$

Untuk mendapatkan hasil dan daya maksimal dari persamaan (2.15) tersebut, kondisi proses haruslah dibandingkan dengan kondisi *dead state* atau lingkungan sehingga:

$$\dot{W}_{max} = \dot{m} ((h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0)) \dots\dots\dots(2.13)$$

Daya maksimal inilah yang dinamakan eksergi (E), sedangkan eksergi spesifik diperoleh dengan persamaan (2.17).

$$e = (h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0) \dots\dots\dots(2.14)$$

Persamaan (2.17) dapat digunakan untuk mengetahui eksergi spesifik dari aliran fluida pada temperatur dan tekanan tertentu yang menghasilkan entalpi (h) dan entropi (s) tertentu pula, relatif terhadap lingkungan pada T_0 dan P_0 . Bila fluida pada kondisi lingkungan, nilai entalpi dan entropi yang digunakan dapat berupa saturasi liquid pada T_0 dan ketika menghitung e, temperatur lingkungan harus dalam keadaan absolut, dapat berupa Kelvin atau derajat *Rankine*.

Dalam melakukan analisis eksergi pada suatu sistem, perlu diketahui keseimbangan eksergi (*exergy balance*) yang menyatakan bahwa perubahan eksergi pada sistem selama proses sama dengan jumlah total transfer eksergi melalui batas sistem dan eksergi yang dimusnahkan dalam sistem karena adanya irreversibilitas.

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} - \dot{E}_{destroyed} = \Delta \dot{E}_{sistem} \dots\dots\dots(2.15)$$

2.6.2. Komponen Eksergi

Eksergi dalam suatu sistem dapat dibagi menjadi empat jenis yaitu eksergi fisik (E_{PH}), eksergi kinetik (E_{KN}), eksergi potensial (E_{PT}), dan eksergi kimia (E_{CH}) asalkan tidak adanya efek-efek nuklir, magnetik, elektrik dan tegangan permukaan (Bejan, 1996). Sehingga eksergi total pada sebuah sistem dapat diformulasikan sebagai berikut :

$$E = E_{PH} + E_{KN} + E_{PT} + E_{CH} \dots\dots\dots(2.16)$$

dimana :

E = eksergi total (kW)

E_{PH} = eksergi fisik (kW)

E_{KN} = eksergi kinetik (kW)

E_{PT} = eksergi potensial (kW)

E_{CH} = eksergi kimia (kW)

Eksergi kinetik dan eksergi potensial diformulasikan sebagai berikut :

$$\dot{E}_{KN} = \frac{1}{2} V^2 \dots\dots\dots(2.17)$$

$$\dot{E}_{PT} = g \cdot z \dots\dots\dots(2.18)$$

Eksergi kimia meliputi komponen eksergi yang terkait dengan perbedaan komposisi kimia dari suatu sistem dengan yang dimiliki lingkungan. Eksergi kimia per mol sebuah campuran pada gas ideal dirumuskan sebagai berikut (Bejan, 1996) :

$$\dot{e}_{CH} = - R \cdot T_0 \cdot \sum (x_k \cdot \ln \frac{x_{0k}}{x_k}) \dots\dots\dots(2.19)$$

dimana :

R = konstanta gas ideal (0,287 kJ/kg.K)

T₀ = temperatur lingkungan (K)

X_k = fraksi mol gas k dalam campuran gas

X_{0k} = fraksi mol gas k pada kondisi *dead state*

Laju eksergi kimia sendiri dapat dirumuskan dengan :

$$\dot{E}_{CH} = \dot{m} \cdot \dot{e}_{CH} \dots\dots\dots(2.20)$$

Eksergi fisik selalu berkaitan dengan temperatur, entalpi dan entropi dari bahan. Dalam sistem tertutup, eksergi fisik pada state tertentu dinyatakan dengan persamaan berikut (Bejan, 1996) :

$$\dot{E}_{PH} = \dot{m} \cdot [(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \dots\dots\dots(2.21)$$

dimana :

E_{PH} = eksergi fisik (kW)

\dot{m} = laju aliran massa (kg/s)

h = entalpi (kJ/kg)

h₀ = entalpi lingkungan (kJ/kg)

T₀ = temperatur lingkungan (°C)

s = entropi (kJ/kg.K)

s₀ = entropi lingkungan (kJ/kg.K)

Kemudian dapat ditentukan nilai eksergi *loss* pada tiap-tiap sub sistem menggunakan persamaan berikut :

$$E_{loss} = I = E_{input} - E_{output} \dots\dots\dots(2.22)$$

dimana :

$$E_{loss/I} = \text{eksergi loss (kW)}$$

$$E_{input} = \text{eksergi input (kW)}$$

$$E_{output} = \text{eksergi output (kW)}$$

Eksergi fisik juga dapat dihitung menggunakan persamaan dari Kotas, (1985) :

$$\dot{E}^{PH} = C_p \left(T - T_o - T_o \ln \frac{T}{T_o} \right) + \bar{R} T_o \ln \frac{p}{p_o} \dots\dots\dots(2.23)$$

dimana :

$$C_p = \text{k calor spesifik gas ideal (kJ/kg.K)}$$

$$R = \text{konstanta gas ideal (0,287 kJ/kg.K)}$$

Persamaan umum untuk menentukan efisiensi eksergetik adalah sebagai berikut:

$$\eta_{eksergi} = \frac{\text{eksergi output}}{\text{eksergi input}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.24)$$

Sedangkan untuk menentukan efisiensi eksergi *overall* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$\eta_{overall} = \frac{W_{net}}{E_k \text{ input}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.25)$$

dimana :

$$W_{nett} = \text{eksergi rate input dikurangi dengan jumlah eksergi output setiap komponen (kW)}$$

$$E_k \text{ input} = \text{eksergi rate input (kW)}$$

2.6.3. Keadaan Mati (*Dead State*)

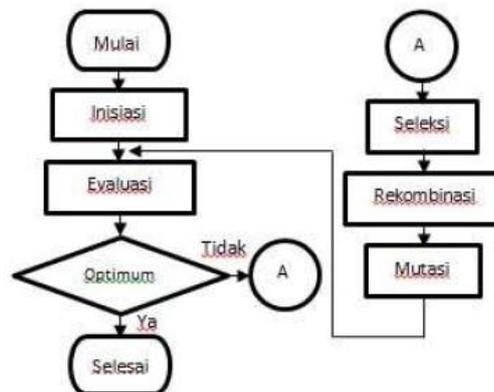
Dead state atau tingkat keadaan mati terjadi apabila keadaan sistem sama dengan tingkat keadaan lingkungan sehingga tidak ada kesempatan untuk menghasilkan kerja. Sebuah sistem pada *dead state* secara termal dan mekanikal setimbang dengan lingkungan pada T_0 dan P_0 . Nilai numerik (T_0 , P_0) yang direkomendasikan untuk *dead state* adalah yang berada pada atmosfer standar yaitu 298,15 K dan 1,013 bar (1 atm) dan pada penelitian tertentu dapat disesuaikan dengan kondisi lingkungan aktualnya (Bejan, 1996).

Apabila tingkat keadaan suatu zat berbeda dengan lingkungan, maka akan tercipta kesempatan untuk menghasilkan kerja. Semakin dekat tingkat keadaan zat dengan lingkungan maka semakin kecil potensinya untuk menghasilkan kerja. Bila tingkat keadaan keduanya sama, maka diperoleh tingkat keadaan mati dimana keduanya memiliki energi, namun eksergi sistem terhadap lingkungan adalah nol .

2.7. Optimasi dengan Metode *Genetic Algorithm*

Secara umum algoritma genetika (*genetic algorithm*) merupakan algoritma komputasi yang terinspirasi dari teori Darwin yang menyatakan bahwa kelangsungan makhluk hidup dipengaruhi oleh aturan yaitu individu yang memiliki nilai *fitness* tinggi akan bertahan hidup dan individu yang memiliki nilai *fitness* rendah akan mati. Teori Darwin juga menyatakan bahwa kelangsungan makhluk hidup dapat dipertahankan melalui proses reproduksi, mutasi, dan persilangan (*crossover*). Teori tersebut kemudian diadopsi menjadi algoritma komputasi untuk mencari solusi dari suatu permasalahan dengan cara yang lebih alamiah (Permadi, 2010).

Salah satu aplikasi dari *genetic algorithm* adalah pada permasalahan optimasi, yaitu dengan mendapatkan suatu nilai solusi yang optimal dari berbagai banyaknya kemungkinan solusi. Suatu *genetic algorithm* standar membutuhkan dua hal untuk didefinisikan yaitu sebuah *genetic representation* dari sebuah solusi domain dan sebuah *fitness function* untuk mengevaluasi nilai domain solusi. *Genetic algorithm* dapat dituliskan dalam berbagai bahasa pemrograman, namun tahapan logika yang digunakan dalam *genetic algorithm* adalah sama. Adapun tahapan logika dalam *genetic algorithm* ditunjukkan pada gambar 2.12 sebagai berikut: (Adhitya, 2017)



Gambar 2.12 Tahapan logika dalam *genetic algorithm*

Tahapan logika dalam *genetic algorithm* pada gambar 2.12 dapat dijelaskan sebagai berikut:

a. Inisiasi

Populasi awal dari suatu kandidat solusi ditentukan secara acak dalam seluruh ruang pencarian

b. Pengkodean kromosom

Kromosom pada *genetic algorithm* merupakan solusi dari satu variabel. Kromosom diwakili oleh beberapa gen. Jenis kode yang digunakan dalam kromosom adalah bentuk biner yaitu 0 dan 1. Kromosom dalam bentuk biner merupakan kromosom genotip dan kromosom dalam bentuk solusi merupakan kromosom fenotip

c. Evaluasi

Populasi yang telah diinisiasi, atau populasi keturunan terbentuk, maka nilai *fitness* dari individu akan dievaluasi. Nilai *fitness* merupakan nilai kemampuan sebuah solusi untuk bertahan.

d. Seleksi

Gagasan utama dari tahapan seleksi adalah untuk mendapatkan solusi terbaik dari generasi terburuk, dan banyaknya prosedur yang telah ditemukan.

e. Rekombinasi

Tahapan rekombinasi yaitu dengan mengkombinasikan bagian dari dua atau lebih solusi induk untuk membentuk individu yang baru sehingga dengan

kemungkinan menjadi solusi yang lebih baik. Tahap rekombinasi biasanya menggunakan mekanisme *crossover* yaitu gen-gen pada setiap kromosom bertukar silang dan menghasilkan anak.

f. Mutasi

Tahapan mutasi yaitu proses dimana menghasilkan kromosom baru dengan memutasi nilai pada salah satu gen pada kromosom awal.

g. Penggantian

Tahap penggantian merupakan keturunan hasil dari seleksi, rekombinasi, dan mutasi akan menghasilkan populasi induk.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Lokasi dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian ini dilaksanakan di PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4, Kabupaten Bandung, Jawa Barat. Waktu pelaksanaan penelitian ini adalah 3 bulan dimulai dari bulan Februari sampai dengan bulan April 2020 yang meliputi survei lapang dan pelaksanaan penelitian.

3.2. Metode Penelitian

Jenis penelitian yang akan digunakan pada penelitian ini adalah penelitian deskriptif dengan pendekatan kuantitatif. Menurut Hamdi dan Bahruddin (2014), penelitian deskriptif merupakan penelitian yang dilakukan sebagai penggambaran fenomena yang ada, baik berlangsung pada saat ini maupun saat yang lampau. Sedangkan untuk pendekatan kuantitatif yaitu pendekatan yang dilakukan dengan menggunakan angka-angka, struktur, pengolahan statistik dan percobaan terkontrol.

3.3. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan diantaranya :

3.3.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mencari referensi yang relevan melalui buku atau jurnal tentang sistem PLTP, prinsip kerja dan komponen-komponen PLTP, siklus termodinamika PLTP, serta analisis energi dan eksergi pada sistem PLTP.

3.3.2. Survei Lapang

Survei lapang dilakukan untuk meninjau dan mengetahui keadaan yang sebenarnya di PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang, yang terletak di Ds. Laksana, Kec. Ibum, Kab. Bandung, Provinsi Jawa Barat.

- State 4** – Uap kering dialirkan menuju turbin untuk menggerakkan generator sebelum itu dialirkan melalui *strainer* untuk memastikan kualitas uap benar-benar kering
- State 5** – Uap dari turbin dialirkan menuju *main condenser* untuk diubah fasanya menjadi fasa cair
- State 6** – Air atau kondensat dari *main condenser* dipompa menggunakan *Hot Well Pump*
- State 7** – Kondensat dari *HWP* dialirkan menuju *Cooling Tower*
- State 8** – Uap hasil pemisahan dari *scrubber* dialirkan menuju *ejector*
- State 9** – pada *main condenser* terdapat NCG sehingga gas tersebut dipompa vakum menuju *ejector* untuk mengurangi kandungan NCG-nya
- State 10** – NCG dari *ejector* dialirkan menuju *inter condenser* untuk dipisahkan fasanya
- State 11** – fasa uap yang masih mengandung NCG dialirkan menuju *Liquid Ring Vacuum Pump*
- State 12** – uap dari *LRVP* dialirkan menuju *Separator* untuk dipisahkan fasanya
- State 13** – fasa uap dari *separator* dialirkan menuju *fan cooling tower*
- State 14** – air dari *cooling tower* dialirkan menuju *auxillary cooling water pump*
- State 15** – air dari *cooling tower* dialirkan menuju *main condenser*
- State 16** – air dari *ACWP* dialirkan menuju *inter condenser* untuk mengkondensasikan uap
- State 17** – air dari *ACWP* dialirkan menuju *LRVP* sebagai pendingin *seeler*.
- State 18** – sisa air dari *separator* dialirkan menuju *main condenser* agar air yang masih tercampur NCG bias terserap kembali oleh *ejector*
- State 19** – sisa air dari *inter condenser* dialirkan menuju *main condenser* agar air yang masih tercampur NCG bias terserap kembali oleh *ejector*
- State 20** – air dari *ACWP* dialirkan menuju *heat exchanger* untuk diturunkan temperaturnya
- State 21** – air dari *heat exchanger* dialirkan menuju *component cooling water pump* untuk pendinginan komponen lain

State 22, 23, 24 – air dari *CCWP* dialirkan menuju *generator, compressor, lube oil* untuk proses pendinginan

State 25 – air dari *heat exchanger* hasil dari *CCWP* dialirkan menuju *cooling tower* untuk diturunkan temperaturnya kembali

State 26 – kondensat dari *HWP* dialirkan menuju *injection well* untuk diinjeksikan ke bumi

State 27 – air dari *raw water* dialirkan menuju *cooling tower* untuk membantu proses

State 28 – fasa uap dari *separator* yang menuju *fan cooling tower* dilepas ke lingkungan

State 29 – uap dari *rock muffler* dilepas ke lingkungan

3.3.4. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan cara memperoleh data di perusahaan yang meliputi *log sheet* operasi maupun data produksi dalam waktu tertentu. Data yang diperlukan dalam parameter penelitian ini yaitu laju aliran massa uap (*steam*), temperatur dan tekanan pada tiap-tiap *state*, temperatur lingkungan, daya pembangkit listrik, serta data lain yang diperlukan untuk menunjang penelitian ini. Metode pengumpulan data yang digunakan pada penelitian ini diantaranya sebagai berikut.

a. Metode Observasi

Metode observasi adalah metode pengumpulan secara langsung pada objek penelitian untuk mendapatkan data-data fisik yang berkaitan dengan komponen PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang yang dilakukan mulai dari *steam field* hingga *power plant*.

b. Metode Wawancara

Metode wawancara adalah metode pengumpulan data dengan cara melakukan kegiatan diskusi dan tanya jawab dengan informan PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang mengenai objek penelitian meliputi asumsi, *set point* pada komponen, dan proses kerja pada PLTP.

c. Metode Dokumentasi

Metode dokumentasi adalah metode pengumpulan data dengan cara menyelidiki objek penelitian melalui melalui dokumen tertulis yang diarsipkan pada *log sheet* harian PLTP untuk menghimpun data yang diperlukan dalam parameter penelitian.

3.3.5. Pengolahan Data

Pengolahan data dalam penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu analisis energi dan analisis eksergi. Analisis tersebut dilakukan dengan menggunakan data-data aktual yang diperoleh dari perusahaan. Data yang telah diperoleh kemudian diolah dengan menggunakan *software Engineering Equation Solver (EES)* untuk melakukan simulasi dan perhitungan. EES merupakan salah satu program penyelesaian persamaan umum, penyelesaian persamaan diferensial dan integral secara numerik, melakukan optimasi, melakukan regresi linear dan non-linear, mengkonversi unit, serta menghasilkan plot kualitas publikasi yang dilengkapi dengan fitur properti termodinamika yang disediakan untuk ratusan zat dengan kemampuannya memecahkan persamaan.

Simulasi dilakukan untuk mengetahui nilai entalpi dan entropi pada setiap *state*. Sebelum melakukan simulasi, perlu dilakukan validasi terlebih dahulu untuk memastikan hasil yang didapatkan relevan dengan keadaan yang sesungguhnya. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi EES dengan tabel properti termodinamika yang terdapat pada aplikasi *ChemicaLogic SteamTab Companion*. Selanjutnya data hasil simulasi dan perhitungan dikompilasi dan disusun menggunakan lembar kerja *Microsoft Excel* untuk memudahkan penyajian dari bentuk tabel menjadi bentuk grafik.

a. Analisis Energi

Analisis energi bertujuan untuk mengetahui nilai laju energi tiap *state* maupun laju energi tiap komponen. Dalam analisis ini semua proses diasumsikan dalam keadaan stedi (*steady state steady flow*). Perhitungan untuk melakukan analisis energi menggunakan persamaan sebagai berikut.

- 1) Persamaan analisis laju energi tiap *state* seperti pada persamaan 3.1.

$$\dot{E}_{n_{state}} = \dot{m} \cdot h_{state} \dots\dots\dots(3.1)$$

- 2) Persamaan analisis laju energi tiap komponen ditunjukkan pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Laju Energi Tiap Komponen

Komponen	Laju Energi
Steam Header	$\dot{E}_n = \dot{E}_{n1} - \dot{E}_{n2}$
Scrubber	$\dot{E}_n = \dot{E}_{n2} - (\dot{E}_{n3} + \dot{E}_{n4} + \dot{E}_{n8})$
Turbine	$\dot{E}_n = \dot{E}_{n4} - \dot{E}_{n5}$
Main Condensor	$\dot{E}_n = (\dot{E}_{n5} + \dot{E}_{n15} + \dot{E}_{n18} + \dot{E}_{n19}) - (\dot{E}_{n6} + \dot{E}_{n9})$
HWP	$\dot{E}_n = \dot{E}_{n6} - (\dot{E}_{n7} + \dot{E}_{n26})$
Cooling Tower	$\dot{E}_n = (\dot{E}_{n7} + \dot{E}_{n13} + \dot{E}_{n25} + \dot{E}_{n27}) - (\dot{E}_{n14} + \dot{E}_{n15} + \dot{E}_{n28})$
Ejector	$\dot{E}_n = \dot{E}_{n8} - \dot{E}_{n10}$
Inter Condensor	$\dot{E}_n = (\dot{E}_{n10} + \dot{E}_{n16}) - (\dot{E}_{n11} + \dot{E}_{n19})$
LRVP	$\dot{E}_n = (\dot{E}_{n11} + \dot{E}_{n17}) - \dot{E}_{n12}$
Separator	$\dot{E}_n = \dot{E}_{n12} - (\dot{E}_{n13} + \dot{E}_{n18})$
ACWP	$\dot{E}_n = \dot{E}_{n14} - (\dot{E}_{n16} + \dot{E}_{n17} + \dot{E}_{n20})$
CCWP	$\dot{E}_n = \dot{E}_{n21} - (\dot{E}_{n22} + \dot{E}_{n23} + \dot{E}_{n24})$
Heat Exchanger	$\dot{E}_n = (\dot{E}_{n20} + \dot{E}_{n21}) - \dot{E}_{n25}$
Rock Muffler	$\dot{E}_n = \dot{E}_{n3} - \dot{E}_{n29}$

b. Analisis Eksergi

Analisis Eksergi merupakan metode analisis untuk menghitung besarnya nilai kehilangan eksergi (irreversibilitas) dan efisiensi eksergetik dalam seluruh proses pada PLTP yang didasarkan pada hukum termodinamika kedua. Pada penelitian ini eksergi yang dianalisis pada PLTP yaitu eksergi fisik. Beberapa tahap yang digunakan untuk analisis laju eksergi pada PLTP dapat dilakukan dengan persamaan sebagai berikut.

- 1) Laju eksergi (\dot{E}) dari setiap *state* menggunakan persamaan 2.21.
- 2) Irreversibilitas dari setiap komponen menggunakan persamaan 2.22 dengan penjabaran yang terdapat pada Tabel 3.2 sebagai berikut:

Tabel 3.2 Irreversibilitas tiap Komponen

Komponen	Irreversibilitas
Steam Header	$I = \dot{E}_1 - \dot{E}_2$
Scrubber	$I = \dot{E}_2 - (\dot{E}_3 + \dot{E}_4 + \dot{E}_8)$
Turbine	$I = \dot{E}_4 - (\dot{E}_5 + W_{\text{gross turbin}})$
Main Condensor	$I = (\dot{E}_5 + \dot{E}_{15} + \dot{E}_{18} + \dot{E}_{19}) - (\dot{E}_6 + \dot{E}_9)$
HWP	$I = \dot{E}_6 - (\dot{E}_7 + \dot{E}_{26})$
Cooling Tower	$I = (\dot{E}_7 + \dot{E}_{13} + \dot{E}_{25} + \dot{E}_{27}) - (\dot{E}_{14} + \dot{E}_{15} + \dot{E}_{28})$
Ejector	$I = \dot{E}_8 - \dot{E}_{10}$
Inter Condensor	$I = (\dot{E}_{10} + \dot{E}_{16}) - (\dot{E}_{11} + \dot{E}_{19})$
LRVP	$I = (\dot{E}_{11} + \dot{E}_{17}) - \dot{E}_{12}$
Separator	$I = \dot{E}_{12} - (\dot{E}_{13} + \dot{E}_{18})$
ACWP	$I = \dot{E}_{14} - (\dot{E}_{16} + \dot{E}_{17} + \dot{E}_{20})$
CCWP	$I = \dot{E}_{21} - (\dot{E}_{22} + \dot{E}_{23} + \dot{E}_{24})$
Heat Exchanger	$I = (\dot{E}_{20} + \dot{E}_{21}) - \dot{E}_{25}$
Rock Muffler	$I = \dot{E}_3 - \dot{E}_{29}$

3) Efisiensi eksergetik komponen dan sistem ditentukan masing-masing pada persamaan 2.24 dan 2.25.

4) *Environment as Dead State*

Informasi mengenai kondisi lingkungan di daerah Kamojang yang dapat digunakan sebagai *dead state* untuk melakukan analisis eksergi disajikan dalam tabel dibawah ini.

Tabel 3.3 Kondisi lingkungan Daerah Kamojang

Parameter	Nilai	Satuan
Ketinggian	± 1500	Mdpi
Temperatur rata-rata	17-20	°C
Tekanan atmosfer	0.85	Bar
Kelembaban	50	%

Pada penelitian ini dilakukan simulasi dengan menggunakan variasi temperatur lingkungan yaitu sebesar 17°C, 18°C, 19°C, 20°C dan 21°C. Temperatur lingkungan tersebut dianggap *dead state* dalam perhitungan laju eksergi. Data yang diperoleh kemudian diolah dan diplot dalam bentuk grafik sehingga dapat dilakukan analisis mengenai pengaruh suhu lingkungan terhadap efisiensi eksergetik pada PLTP.

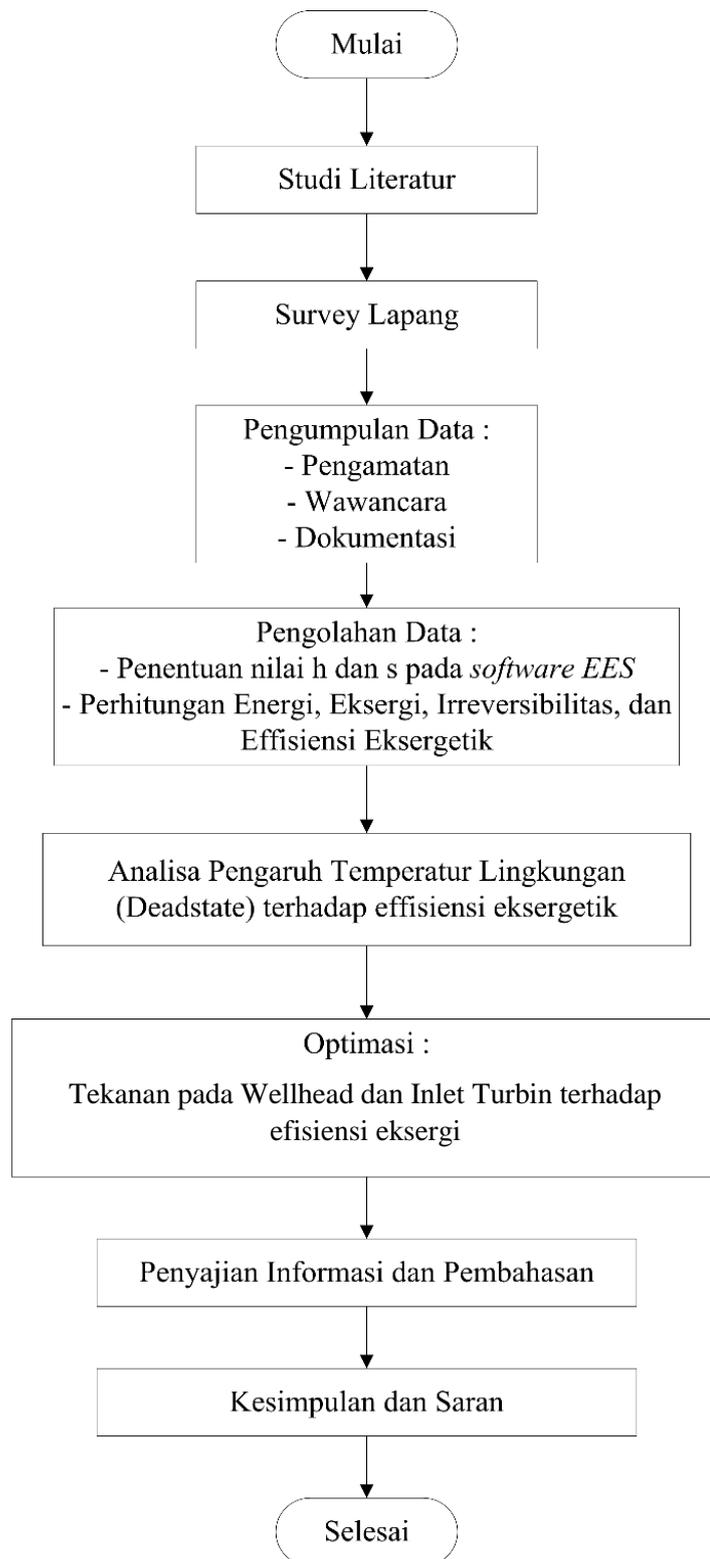
c. Optimasi Efisiensi Eksergi Metode *Genetic Algorithm*

Penentuan besarnya nilai efisiensi eksergi yang optimal, dapat dilakukan dengan proses optimasi pada sistem. Pada penelitian ini dilakukan optimasi menggunakan metode *genetic algorithm* dengan variabel tekanan pada *wellhead* dan *inlet turbine*. *Constraint* masing-masing variabel ditentukan berdasarkan kondisi operasi pada sistem PLTP.

Sistem PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang menggunakan nilai *constraint* pada optimasi ini yaitu 11-13 bar tekanan pada *wellhead* dan 10-11,5 bar pada *inlet turbine* berdasarkan data desain PLTP.

3.4. Diagram Alir Penelitian

Proses penelitian ini dilaksanakn mulai dari tahap pengambilan data sampai dengan tahap pembuatan kesimpulan dan saran yang secara lengkap disajikan dalam diagram alir seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Nilai Energi dan Eksergi PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4

Perhitungan nilai energi dan eksergi pada PLTP dilakukan pada setiap komponen dan *state* yang didefinisikan pada gambar 3.1. Data yang diperoleh dari *logsheet* PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4 adalah data tekanan dan temperatur serta data laju aliran massa pada setiap *state* tersebut pada bulan Februari 2020 dengan kapasitas pembangkitan 55,37 MW. Data yang diperoleh kemudian digunakan untuk analisis energi dan eksergi yang dijelaskan pada bab 3. Adapun data hasil pengukuran pada setiap *state* yang diperoleh ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data pada setiap *state*

<i>Stream</i>		<i>State</i>	<i>Pressure</i> (bar)	<i>Temperature</i> (°C)	<i>Mass Flow</i> (kg/s)
<i>from</i>	<i>to</i>				
Prod. Well		0	11.73	191.35	134.51
Prod. Well	Steam Header	1	10.8	188.2	127.16
Steam Header	Scrubber	2	10.88	186.59	127.16
Scrubber	Rock Muffler	3	10.02	183.34	0.24
Scrubber	Turbine	4	10.23	183.34	124.91
Turbin	Main Condenser	5	0.15	56.03	122.55
Main Condenser	HWP	6	1.15	56.03	2004.63
HWP	Cooling Tower	7	1.29	51.64	1969.79
Scrubber	Ejector	8	10.23	183.34	2.00001
Main Condenser	Ejector	9	0.72	47.02	2.36
Ejector	Inter Condenser	10	0.5	149.7	1.97
Inter Condenser	LRVP	11	0.4	46.75	2.18
LRVP	Separator	12	0.6	32.9	6.59
Separator	Cooling Tower	13	0.9	34.2	2.16
Cooling Tower	ACWP	14	1.25	28.89	259.45
Cooling Tower	Main Condenser	15	1.25	28.89	2004.63
ACWP	Inter Condenser	16	1.82	28.89	188.52
ACWP	LRVP	17	1.82	28.88	4.41
Separator	Main Condenser	18	0.9	38.5	1.64
Inter Condenser	Main Condenser	19	0.4	37.79	160.25
ACWP	Heat Exchanger	20	1.82	28.88	66.52
Heat Exchanger	CCWP	21	3.27	38.65	66.05

CCWP	Generator	22	3.27	35.88	51.54
CCWP	Compressor	23	3.27	35.88	0.556
CCWP	Lube Oil	24	3.27	35.88	13.87
Heat Exchanger	Cooling Tower	25	0.9	34.25	27.398
HWP	Injection Well	26	2.6	51.64	34.832
Raw Water	Cooling Tower	27	4.6	27	444.8
Cooling Tower	Environment	28	0.85	27	2.166
Rock Muffler	Environment	29	0.85	27	0.248

Berdasarkan data yang diperoleh pada tabel 4.1, kemudian dilakukan simulasi dan perhitungan pada *software Engineering Equation Solver (EES)* untuk mengetahui nilai entalpi, entropi, laju energi, serta laju eksergi pada tiap *state*. Simulasi dan perhitungan tersebut digunakan parameter kondisi lingkungan pada PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4 dengan data temperatur sebesar 18,4°C pada tekanan atmosfer serta nilai entalpi dan entropi pada kondisi tersebut masing-masing sebesar 77,22 kJ/kg dan 0.273 kJ/kg.°C. Adapun perhitungan laju energi dan laju eksergi tiap *state* masing-masing menggunakan persamaan 3.1 dan persamaan 2.21. Hasil simulasi dan perhitungan pada *software Engineering Equation Solver (EES)* ditunjukkan pada tabel 4.2 sebagai berikut.

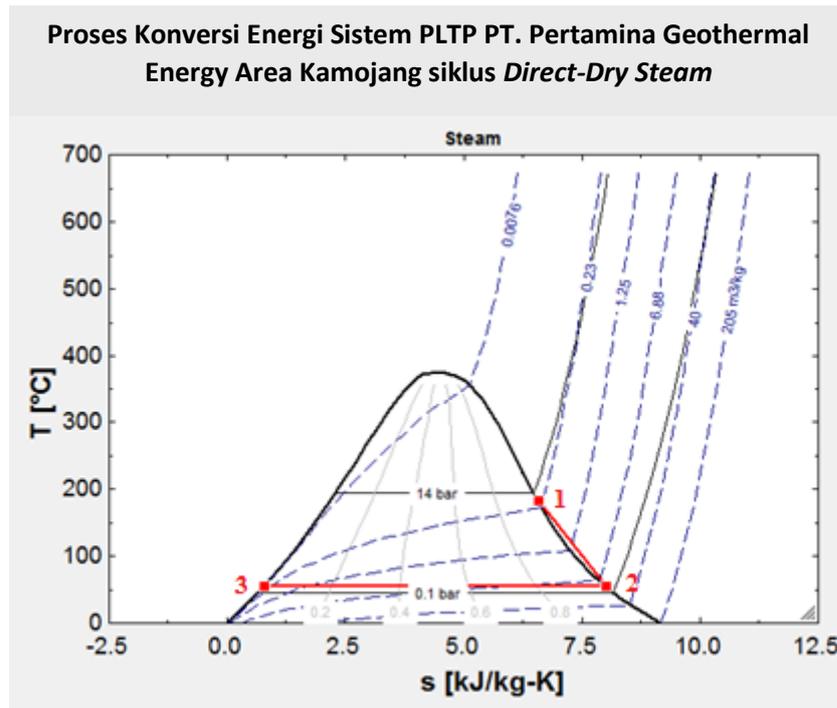
Tabel 4.2 Hasil simulasi dan perhitungan laju energi dan eksergi

<i>State</i>	<i>Entalphy</i>	<i>Entropy</i>	<i>Energy Rate</i>	<i>Exergy Rate</i>
	(kJ/kg)	(kJ/kg.°C)	(kW)	(kW)
0	2795.07	6.556	375965.70	119308.46
1	2793.32	6.587	355200.69	111418.31
2	2788.44	6.574	354580.14	111279.47
3	2786.24	6.604	691.09	214.35
4	2784.63	6.592	347835.66	108181.07
5	2602.25	8.013	318908.58	33039.04
6	234.64	0.781	470366.93	18821.09
7	216.33	0.725	426126.73	14571.01
8	2784.63	6.592	5569.31	1732.12
9	196.94	0.665	465.09	12.97
10	2779.63	7.939	5501.89	927.40
11	195.79	0.662	428.42	11.41
12	137.91	0.476	909.36	10.13
13	143.37	0.494	310.56	3.79
14	121.26	0.412	31461.03	917.26
15	121.26	0.412	243081.72	7087.18

16	121.25	0.412	22858.71	664.63
17	121.25	0.412	534.19	15.53
18	161.34	0.552	265.84	4.65
19	158.34	0.543	25375.05	391.35
20	121.25	0.421	8065.53	60.05
21	162.21	0.554	10714.15	205.19
22	150.62	0.517	7762.29	118.45
23	150.62	0.517	83.74	1.28
24	150.62	0.517	2089.43	31.88
25	143.59	0.495	3934.21	46.01
26	216.45	0.725	7539.57	261.85
27	113.61	0.395	50533.73	373.28
28	113.27	0.395	245.36	1.08
29	113.27	0.395	28.09	0.12

Berdasarkan data pada tabel 4.2, nilai entalpi, entropi, laju energi serta laju eksergi digunakan untuk analisis energi maupun analisis eksergi pada masing-masing komponen PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4. Data pada tabel 4.2 juga digunakan untuk simulasi *Environment as Dead State* serta optimasi tekanan pada *wellhead* dan *inlet turbine* yang akan berpengaruh pada efisiensi eksergetik pada keseluruhan sistem PLTP.

Data pada tabel 4.2 dapat digunakan untuk mengetahui proses konversi energi pada PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4 menggunakan nilai temperature dan entalpi (*T-s diagrams*) pada gambar 4.1 yang mengacu pada penjelasan gambar 2.9 adalah sebagai berikut.



Gambar 4.1 *T-s diagrams* proses konversi energi

PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang merupakan pembangkit listrik panas bumi yang didominasi uap kering (*superheated vapor*) dengan keluaran uap dari sumur produksi mencapai tekanan 11 – 13 bar dengan temperatur kisaran 195°C sehingga siklus yang digunakan yaitu *direct-dry steam*.

Proses konversi energi pada siklus *direct-dry steam* dimulai dari *turbine* pada point 1 yang terdapat pada gambar 4.1 hingga point 3. Pada point 1 menjelaskan keadaan pada *turbine* yaitu pada tekanan 10.23 bar dan temperature dibawah 200°C memiliki nilai entropi 6,59 kJ/kg.°C dan nilai entropi pada point 2 yaitu 8.01 kJ/kg.°C. Proses dari point 1 ke point 2 terlihat terjadi kenaikan pada nilai entropi. Hal tersebut dikarenakan pada proses tersebut merupakan proses konversi energi pada *turbine* yang terjadi proses ekspansi yang mengakibatkan turunnya nilai entalpi dan meningkatnya nilai entropi. Berdasarkan penjelasan mengenai *property* termodinamika menurut Cengel and Boles, 2015 bahwa entropi menggambarkan bahwa energi selalu mengalir secara spontan dari temperatur tinggi ke temperatur rendah. Sedangkan pada point 2 menuju point 3 merupakan proses kondensasi uap dari *turbine* menuju *main condensore* yaitu dari fluida fasa uap menjadi fasa cair. Selanjutnya dilakukan analisis nilai energi untuk mengetahui seberapa besar laju energi pada setiap komponen PLTP.

4.1.1. Analisis Nilai Energi Sistem PLTP

Analisis energi bertujuan untuk mengetahui kinerja sistem secara kuantitatif yang dapat dihitung dengan pendekatan Hukum Termodinamika Pertama tentang kekekalan energi. Kuantitas kinerja sistem dapat ditentukan menggunakan besarnya laju energi yang masuk pada setiap komponen. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan dengan menggunakan rumus pada tabel 3.1 dengan nilai laju energi tiap *state* pada tabel 4.2, maka kuantitas laju energi pada setiap komponen ditunjukkan pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Laju Energi tiap Komponen

Komponen	Laju Energi (kW)
Steam Header	620.54
Scrubber	484.08
Turbine	28927.08
Main Condensor	116799.16
HWP	36700.64
Cooling Tower	206117.12
Ejector	67.42
Inter Condensor	2557.13
LRVP	53.25
Separator	332.96
ACWP	2.59
CCWP	778.68
Heat Exchanger	14845.47
Rock Muffler	662.99

Berdasarkan tabel 4.3 dapat diketahui bahwa nilai laju energi dihitung berdasarkan nilai laju energi yang masuk dikurangi dengan laju energi yang keluar pada setiap komponen atau dapat dilihat pada tabel 3.1. PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang menggunakan siklus *direct-dry steam* sehingga komponen PLTP yang mendistribusikan uap menuju *turbine* tidak terlalu banyak.

Laju energi pada *steam header* yaitu diperoleh dari *wellhead* atau sumur produksi dengan nilai sebesar 355200,689 kW sedangkan nilai energi keluarannya sebesar 354580,144 kW, sehingga didapat nilai laju energi pada *steam header* sebesar 620,54 kW kemudian uap masuk ke *scrubber* untuk pembersihan material kotoran yang masih terbawa uap. Nilai laju energi pada *scrubber* sebesar 484,08

kW. Proses pada komponen *steam header* dan *scrubber* tersebut terjadi secara konstan tanpa adanya penambahan kerja dari luar sistem, sehingga nilai laju energi yang masuk mengalami penurunan karena adanya perubahan nilai entalpi selama proses distribusi uap.

Komponen selanjutnya yaitu *turbine* yang memiliki nilai laju energi sebesar 28927,08 kW, energi tersebut digunakan untuk memutar generator hingga menghasilkan listrik. Berdasarkan perhitungan kerja turbin, didapat nilai kerja turbin sebesar 22781,579 kW yang diperoleh berdasarkan nilai entalpi masuk dan keluar pada turbin serta seberapa besar nilai massa uap yang digunakan. Uap yang sudah terpakai untuk memutar turbin selanjutnya dikondensasikan. Proses kondensasi uap terjadi pada *main condensore*, berdasarkan tabel 4.3 nilai laju energi pada *main condensore* sebesar 116799,16 kW. Nilai laju energi tersebut selain berasal dari turbin dan air pendingin dari *cooling tower*, energi tersebut juga berasal dari *Gas Removal System* yaitu terdiri dari *ejector*, *LRVP*, *inter condensore*, dan *separator* yang digunakan untuk menghisap dan menghilangkan NCG yang terdapat di *main condensore* untuk dibuang ke lingkungan, sedangkan kondensat hasil proses kondensasi didistribusikan menuju *cooling tower* untuk didinginkan kembali dengan bantuan *Hot Well Pump (HWP)* dengan laju energi sebesar 36700,64 kW.

Komponen yang memiliki laju energi terbesar yaitu pada *cooling tower*. Nilai laju energi pada *cooling tower* yaitu sebesar 206117,12 kW. Hal tersebut dikarenakan *cooling tower* merupakan komponen yang berfungsi penuh dalam pendinginan fluida air. Prinsip kerja pendinginan pada *cooling tower* terjadi pada *fan* yang terdapat di dalam *cooling tower*, sehingga fluida air yang masuk dari atas *cooling tower* akan didinginkan oleh *fan* tersebut dengan bantu udara dari lingkungan *cooling tower*. Fluida air tersebut selain digunakan pada pendinginan uap pada proses kondensasi, fluida air tersebut digunakan pada pendinginan komponen lain seperti *inter condensore*, *silling LRVP*, *heat exchanger*, *generator cooler*, *lube oil cooler*, serta *air compressor*. Proses pendistribusian fluida air tersebut dibantu dengan pompa yaitu *Auxilliary Cooling Water Pump (ACWP)* dan

juga *Component Cooling Water Pump (CCWP)* sehingga nilai laju energi pada *cooling tower* dalam hal ini cukup besar.

Analisis laju energi sistem PLTP pada umumnya hanya menunjukkan nilai energi masuk dan keluar serta perubahan energi akibat penurunan entalpi selama proses pada setiap komponen PLTP. Nilai laju energi pada setiap komponen tersebut tentunya tidak semuanya dikonversi menjadi kerja karena adanya pengaruh dari lingkungan, dengan demikian pada penelitian ini dilakukan analisis nilai eksergi untuk mengetahui letak dan seberapa besar kehilangan eksergi pada masing-masing komponen PLTP sehingga dapat dijadikan acuan dalam proses optimasi sistem PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang terutama pada unit 4 untuk meningkatkan efisiensi kinerja sistem.

4.1.2. Analisis Nilai Eksergi Sistem PLTP

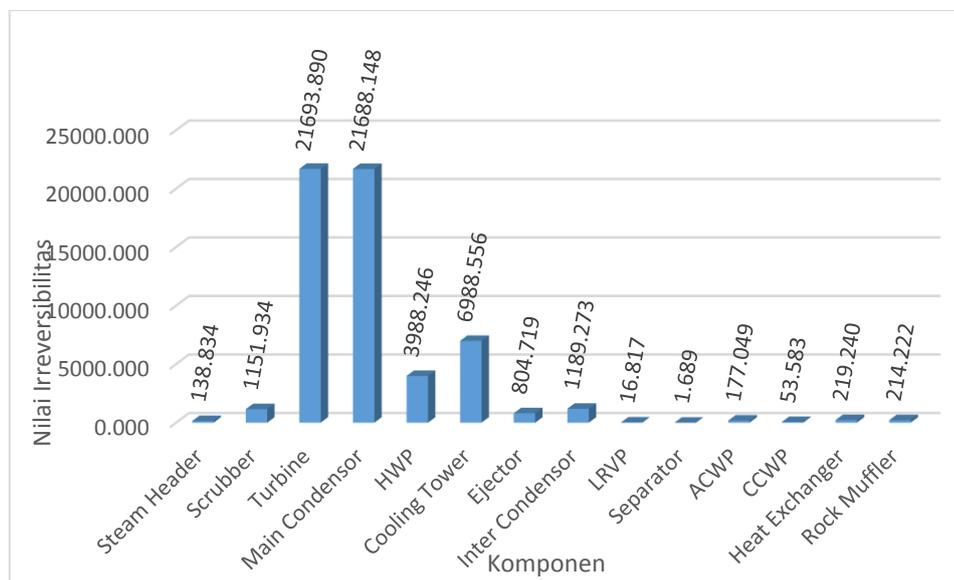
Analisis eksergi bertujuan untuk mengetahui besar, letak, serta penyebab terjadinya irreversibilitas pada sistem atau pemusnahan eksergi pada suatu komponen PLTP. Pada penelitian ini hanya dilakukan analisis eksergi secara fisik dikarenakan pada sistem tidak terjadi proses pembakaran maupun tidak menghasilkan produk dari pembakaran itu sendiri.

Analisis eksergi dilakukan dengan mengetahui nilai laju eksergi masuk dan keluar pada setiap komponen. Laju eksergi yaitu ukuran ketersediaan energi yang mampu digunakan dalam suatu proses per satuan waktu untuk melakukan kerja. Adapun tabel 4.4 merupakan laju eksergi masuk dan keluar pada setiap komponen sedangkan tabel 4.5 merupakan hasil perhitungan irreversibilitas tiap komponen berdasarkan perhitungan nilai laju eksergi masuk dikurangi dengan laju eksergi keluar pada setiap komponen pada tabel 4.4 atau dengan menggunakan rumus irreversibilitas tiap komponen pada tabel 3.2.

Tabel 4.4 Laju Eksergi tiap Komponen

Komponen	Laju Eksergi Masuk (kW)	Laju Eksergi Keluar (kW)
Steam Header	111418.31	111279.47
Scrubber	111279.47	110127.54
Turbine	108181.07	86487.18
Main Condensor	40522.21	18834.06
HWP	18821.09	14832.85
Cooling Tower	14994.08	8005.52
Ejector	1732.12	927.40
Inter Condensor	1592.03	402.76
LRVP	26.94	10.13
Separator	10.13	8.44
ACWP	917.26	740.21
CCWP	205.19	151.61
Heat Exchanger	265.25	46.01
Rock Muffler	214.35	0.12

Berdasarkan Tabel 4.4 maka nilai irreversibilitas pada setiap komponen PLTP dapat diketahui sebagai berikut.



Gambar 4.2 Grafik Nilai Irreversibilitas tiap Komponen

Menurut Cengel *and* Boles, 2015 irreversibilitas merupakan ketidakmampuan proses untuk kembali ke keadaan awal proses akibat gesekan atau ekspansi tak terkendali, perpindahan panas yang melintasi perbedaan suhu yang terbatas, hambatan listrik dan reaksi kimia. Gambar 4.2 menunjukkan nilai

irreversibilitas pada masing-masing komponen PLTP, terlihat bahwa nilai irreversibilitas tertinggi pada komponen *turbine* dengan nilai 21693,890 kW kemudian diikuti dengan *main condensor* dengan nilai 21688,148 kW. Kedua komponen tersebut merupakan komponen yang memiliki nilai irreversibilitas terbesar terutama pada *turbine*.. Adapun penjabaran terjadinya irreversibilitas serta penyebabnya pada masing-masing komponen adalah sebagai berikut.

a. *Steam Header*

Berdasarkan tabel 4.4 nilai laju eksergi yang masuk pada *steam header* yaitu sebesar 111418,31 kW yang berasal dari *well head* dan laju eksergi yang keluar sebesar 111279,47 kW sehingga nilai irreversibilitas pada *steam header* yaitu sebesar 138,834 kW. Irreversibilitas tersebut terjadi karena gesekan antara uap dengan *stop valve* serta *pipe line* yang akan mengarah ke PLTP.

b. *Scrubber*

Fungsi utama *scrubber* yaitu untuk membuang zat-zat pengotor serta sebagai pemisah fluida cair yang masih terbawa oleh fluida uap sehingga uap yang masuk ke turbin benar-benar uap kering. Prinsip kerja *scrubber* sendiri yaitu dengan menciptakan gaya sentrifugal yang akan membentuk *vortex*. Adanya gaya tersebut menyebabkan *pressure drop* yang akan membuat uap yang memiliki massa jenis besar akan turun ke bawah, sehingga hal tersebut merupakan penyebab irreversibilitas komponen. Nilai irreversibilitas pada komponen ini yaitu sebesar 1151,934 kW. Selain penyebab gesekan pada saat separasi, pada komponen ini dilengkapi dengan *safety valve* yang berfungsi untuk menjaga keluaran uap ketika terjadi tekanan berlebih. Kelebihan tekanan akan diarahkan menuju *silincer* atau dibuang ke *rock muffler*.

c. *Turbine*

Komponen yang terpenting dari sebuah pembangkit yaitu turbin. Turbin berfungsi untuk mengubah energi kimia menjadi energi mekanik sehingga mampu memutar generator. Berdasarkan tabel 4.4 laju eksergi masuk pada turbin yaitu sebesar 108181,07 kW yang dapat memutar turbin dan generator agar membangkitkan daya serta laju eksergi keluar dari turbin sebesar 86487,18 kW sehingga didapat nilai irreversibilitas pada turbin yaitu sebesar 21693,890 kW.

Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan 2.3 hingga 2.4 didapat nilai kerja turbin sebesar 22781,585 kW dan W_{thermal} turbin sebesar 53448.14074 kW dengan nilai efisiensi turbin sebesar 71,129% serta nilai efisiensi generator yaitu 96,04% dengan total daya yang dibangkitkan (W_{gross}) sebesar 55368,97 kW atau 55,37 MW. Nilai efisiensi turbin dipengaruhi oleh *Steam Specific Consumption* (SSC) yaitu jumlah uap yang dibutuhkan untuk memutar generator. Nilai SSC sendiri didapat dari desain turbin. Hubungan SSC dengan efisiensi turbin yaitu semakin besar nilai SSC maka semakin rendah nilai efisiensi turbin, sehingga kerja turbin semakin besar. Hal ini merupakan salah satu penyebab terjadinya irreversibilitas.

Irreversibilitas pada turbin juga dipengaruhi oleh gesekan antara uap masuk turbin dengan sudu-sudu turbin selama proses ekspansi sehingga mengakibatkan ada *pressure drop*. Proses ekspansi uap pada turbin juga menimbulkan adanya zat silica yang masih terbawa oleh uap sehingga ketika mengenai sudu turbin akan mengarat seiring berjalannya proses dan akan menyebabkan terjadinya deposit silica. Deposit silica dapat mempengaruhi kinerja turbin sehingga efisiensi sistem akan menurun.

d. *Main Condensor*

Berdasarkan tabel 4.4 laju eksergi yang masuk dan keluar dari komponen *main condenser* masing-masing yaitu 40522,21 kW dan 18834,06 kW. Pada komponen *main condenser* nilai irreversibilitas yaitu sebesar 21688,148 kW yang disebabkan karena adanya perpindahan panas yang terjadi akibat kontak langsung antara fluida cair dari *cooling tower* yang masuk ke *main condenser* dengan uap panas dari *turbine*, sehingga uap panas akan terkondensasi menjadi cair. Proses kondensasi ini disebut dengan *direct contact condensing* yang merupakan tipe atau prinsip kerja *main condenser* yang dimiliki oleh PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4. Pada *main condenser* memiliki *nozzle* yang berfungsi untuk menyemprotkan fluida cair ke uap panas.

Nozzle dapat mempengaruhi kinerja *main condenser*, dikarenakan *nozzle* yang tersumbat akan mengakibatkan penyemprotan fluida cair tidak efisien. Penyemprotan fluida cair ke uap terjadi dalam bentuk *spray*, namun ketika ada

penyumbatan pada *nozzle* maka penyemprotan menjadi bentuk *film water* sehingga kondensat memiliki suhu tinggi dan terjadi kenaikan tekanan pada *main condenser*.

e. *Hot Well Pump*

Uap panas dari *turbine* yang terkondensasi pada *main condenser* atau yang disebut kondensat memiliki temperatur yang masih tinggi dari pada fluida cair untuk pendinginan, sehingga perlu dilakukan pendinginan ulang pada kondensat tersebut. Proses pendinginan terjadi pada komponen *cooling tower* sehingga kondensat butuh dorongan untuk menuju *cooling tower*. *Hot well pump* berfungsi untuk memompakan kondensat dari *main condenser* menuju *cooling tower* tepatnya berada di *fan cooling tower*. Proses pemompaan kondensat tersebut membutuhkan laju eksergi pada *hot well pump* sebesar 18821,09 kW sehingga dapat memompakan kondensat dengan laju 1969,7995 kg/s. Pada proses tersebut terjadi banyak gesekan antara fluida dan pipa serta proses tersebut melawan gravitasi bumi untuk mengangkat fluida keatas, sehingga irreversibilitas pada komponen ini yaitu sebesar 3988,246 kW.

f. *Cooling Tower*

Komponen *cooling tower* merupakan komponen PLTP yang berfungsi penuh dalam pendinginan fluida gas menjadi cair yaitu dalam proses kondensasi uap dari *turbine* ke *main condensor (Steam Return and Condensore)*. Selain sebagai fungsi dari proses kondensasi uap, air keluaran *cooling tower* digunakan sebagai pendinginan komponen lain seperti *Auxilliary Cooling Water Pump*.

Proses pendinginan melibatkan proses distribusi air dari *cooling tower* ke komponen yang dituju sehingga pada proses tersebut sering terjadi gesekan antara pipa dan juga fluida air, hal tersebut merupakan penyebab terjadinya irreversibilitas. Nilai irreversibilitas pada komponen ini sebesar 6988,556 kW.

g. *Gas Removal System*

Gas Removal System merupakan suatu komponen yang digunakan untuk menghilangkan gas yang bersifat *Non-Condensable Gas (NCG)* yang terdapat pada uap panas yang masuk ke komponen *turbine* maupun *main condensore*. NCG dapat mempengaruhi kinerja sistem, terutama pada komponen *turbine*. Efek dari NCG sendiri pada *turbine* yaitu akan menjadikan adanya pengamatan pada sudu turbin

akibat banyaknya zat silica yang menempel. Selain mempengaruhi kinerja turbin, NCG dapat menaikkan tekanan pada komponen *main condenser* ketika nilai NCG tinggi. Solusi pengurangan NCG tersebut yaitu dengan penambahan *Gas Removal System*.

Gas Removal System pada PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4 terdiri dari komponen *ejector*, *inter condenser*, *Liquid Ring Vacuum Pump* (LRVP), dan *separator*. Prinsip kerja dari *Gas Removal System* sendiri yaitu terjadi penghisapan NCG secara tersirkulasi, artinya uap panas yang mengandung NCG yang keluar dari *turbine* ke *main condenser* akan dihisap secara otomatis oleh *ejector*. Komponen *ejector* dibantu dengan tekanan uap tinggi keluaran dari *scrubber* sehingga mampu menghisap gas pada *main condenser*. Gas yang terhisap akan dikondensasikan kembali pada *inter condenser*. Pada *inter condenser* pada prinsipnya seperti *main condenser* namun dibantu dengan komponen LRVP untuk memvakumkan pada komponen tersebut, sehingga uap yang masih mengandung NCG akan dipompa oleh LRVP menuju *separator* untuk dipisahkan kembali. Kondensat hasil dari *inter condenser* maupun *separator* dialirkan menuju *main condenser* untuk disirkulasikan kembali. Harapan dari sistem tersebut yaitu untuk menghilangkan uap yang mengandung NCG ketika dibuang ke lingkungan maupun agar tidak mengganggu kinerja sistem PLTP.

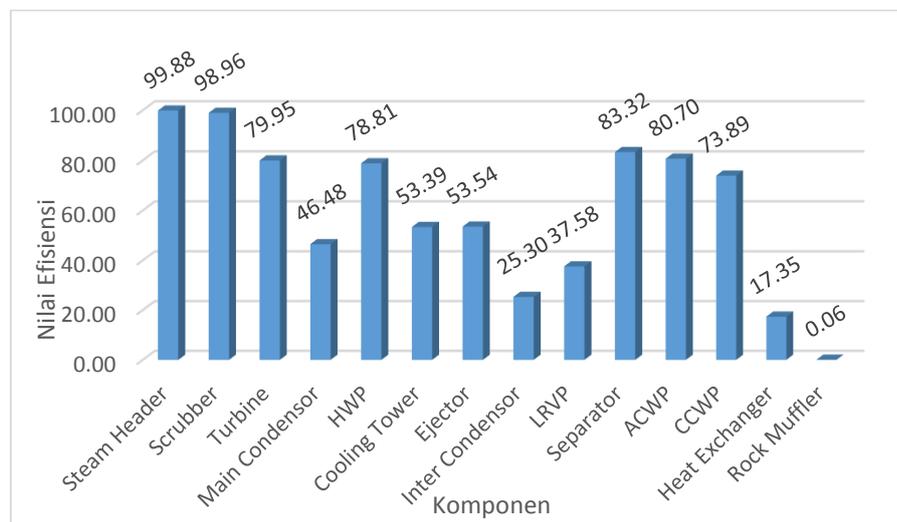
Nilai irreversibilitas pada masing-masing komponen *Gas Removal System* yaitu 804,719 kW pada *ejector*, 1189,273 kW pada *inter condenser*, 16,817 kW pada LRVP, dan 1,689 kW pada *separator*.

h. *Cooling Water Application*

Cooling Water Application merupakan komponen pendukung pada PLTP yang berfungsi sebagai pendingin pada komponen besar, sehingga pindah panas pada komponen yang didinginkan tetap pada kondisi stabil. Komponen *Cooling Water Application* pada PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4 terdiri dari *Auxiliary Cooling Water Pump* (ACWP), *Component Cooling Water Pump* (CCWP), serta *heat exchanger*. Fluida yang digunakan pada sistem tersebut yaitu fluida cair yang berasal dari *cooling tower* sebagai sistem pendinginan komponen kemudian disirkulasikan kembali ke *cooling tower*.

Adapun fungsi dari masing-masing komponen pendingin yaitu sebagai pendinginan *inter condenser*, *separator*, *silincer*, *silling LRVP*, oleh komponen ACWP. Sebagian air pendingin ACWP diarahkan menuju *heat exchanger* untuk proses transfer panas menuju CCWP yang digunakan sebagai pendinginan pada generator cooler, lube oil cooler, dan air compressor. Diketahui nilai irreversibilitas pada komponen pendingin dari perhitungan laju ekersegi masuk dan keluar setiap komponen masing-masing yaitu sebesar 177,049 kW pada ACWP, 53,583 kW pada CCWP, dan sebesar 219,40 kW pada *heat exchanger*. Nilai irreversibilitas pada *heat exchanger* terlihat lebih besar dari komponen pendingin lain, hal tersebut dikarenakan nilai kerja *heat exchanger* lebih besar yang terletak pada proses perpindahan panasnya.

Berdasarkan analisis eksergi dan irreversibilitas pada setiap komponen PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4 dapat diketahui nilai efisiensi ekergetik pada setiap komponen. Nilai efisiensi eksergetik pada setiap komponen dapat dihitung menggunakan persamaan 2.24. Adapun nilai efisiensi eksergetik pada setiap komponen dapat ditunjukkan oleh grafik pada gambar 4.3 sebagai berikut.



Gambar 4.3 Nilai Efisiensi Eksergetik tiap Komponen

Berdasarkan gambar 4.2 nilai irreversibilitas tiap komponen dan gambar 4.3 nilai efisiensi eksergetik tiap komponen dapat dilihat bahwa keduanya memiliki

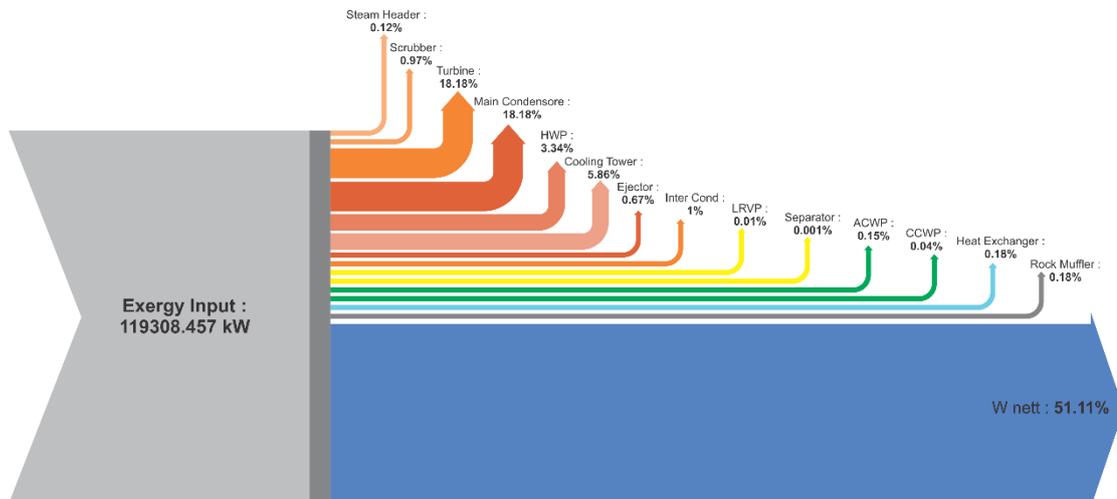
hubungan. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa semakin besar nilai irreversibilitas pada komponen maka semakin kecil nilai efisiensi eksnerginya. Artinya nilai efisiensi eksnergi yang kecil menunjukkan komponen tersebut memiliki masalah yang besar dalam pemusnahan eksnergi sehingga kerja komponen tidak efisien atau komponen tersebut tidak bisa kembali ke kondisi awal proses.

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa nilai efisiensi pada *steam header* dan *scrubber* yaitu diatas 90%, artinya komponen tersebut tidak banyak terjadi pemusnahan eksnergi. Pada komponen utama PLTP yaitu *turbine*, *main condensore*, serta *cooling tower* masing-masing memiliki nilai efisiensi eksnergi sebesar 79,95% untuk *turbine* diakibatkan proses ekspansi yang tinggi, 46,48% untuk *main condensore*, dan 53,39% untuk *cooling tower* diakibatkan karena proses perpindahan panas berlebih serta penyumbatan pada pipa.

4.1.3. Analisis Efisiensi Eksnergi *Overall*

Efisiensi eksnergi keseluruhan sistem PLTP (*overall*) digunakan untuk mengetahui seberapa besar nilai eksnergi yang mampu dikonversi menjadi listrik. Efisiensi eksnergi *overall* dapat diketahui dengan membandingkan nilai eksnergi keluaran sistem dengan nilai eksnergi masukan sistem. Eksnergi keluaran sistem merupakan jumlah eksnergi dari setiap komponen PLTP, sedangkan eksnergi masukan merupakan jumlah eksnergi masuk pada sistem PLTP yaitu eksnergi yang diberikan oleh *production well*. Hasil perhitungan efisiensi eksnergi *overall* pada PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4 yaitu sebesar 51,11%.

Grassmann Diagrams menunjukkan dengan jelas letak maupun besarnya pemusnahan eksnergi serta *exergy flow* sistem PLTP pada gambar 4.4 sebagai berikut.



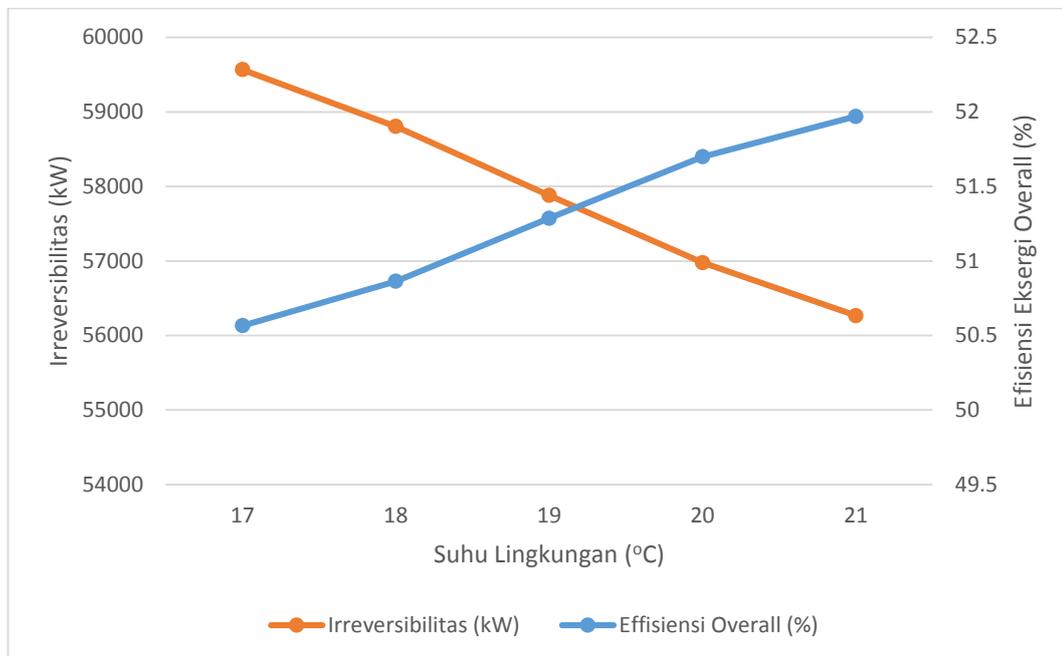
Gambar 4.4 *Grassmann Diagrams exergy flow* PLTP PT. PGE Kamojang Unit 4

Grassmann Diagrams exergy flow pada gambar 4.4 menunjukkan gambaran yang lebih jelas tentang aliran eksergi masuk dan keluar sistem PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4, meskipun aliran eksergi serta laju pemusnahan eksergi pada setiap komponen sudah dijabarkan sebelumnya. Berdasarkan gambar 4.4 nilai eksergi masuk sistem PLTP yaitu sebesar 119308,457 kW. Irreversibilitas yang terjadi pada setiap komponen PLTP menyebabkan jumlah eksergi masuk pada sistem tidak dapat dikonversi menjadi energi listrik sepenuhnya, sehingga berdasarkan perhitungan didapat nilai efisiensi eksergi *overall* sistem pada PLTP yaitu sebesar 51,11% artinya hanya 60982.256 kW (W_{nett}) yang dapat dikonversi menjadi energi listrik.

4.2. Analisis *Environment as Dead State*

Analisis *environment as dead state* digunakan untuk mengetahui pengaruh suhu lingkungan terhadap irreversibilitas dan efisiensi eksergi *overall* pada sistem PLTP. Berdasarkan tabel 3.3 kondisi lingkungan di Area Kamojang yaitu kisaran 17 – 20°C sehingga digunakan variasi suhu lingkungan yaitu 17°C, 18°C, 19°C, 20°C, dan 21°C. Suhu lingkungan tersebut dianggap sebagai titik mati pada perhitungan laju eksergi dan digunakan nilai beban pembangkitan sesuai dengan kapasitas *turbine* yaitu 60MW.

Berdasarkan perhitungan analisis *environment as dead state* yang dilakukan didapat hasil yang ditunjukkan pada gambar 4.5 sebagai berikut.



Gambar 4.5 Analisis *Environment as Dead State*

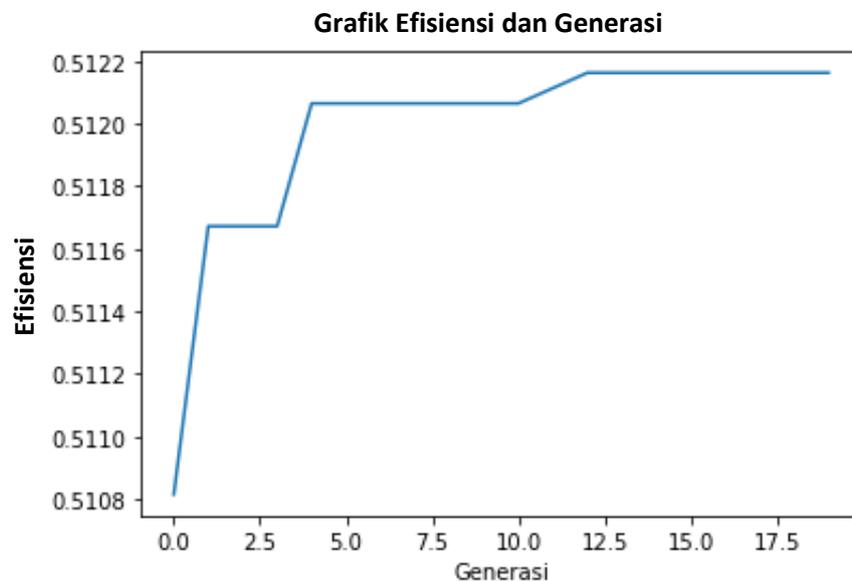
Pengaruh suhu lingkungan terhadap irreversibilitas dapat diketahui pada gambar 4.5 menunjukkan nilai irreversibilitas atau nilai total eksergi yang dimusnahkan oleh sistem pada masing-masing suhu lingkungan yaitu 59567,82 kW pada 17°C, 58805,35 kW pada 18°C, 57880,11 kW pada 19°C, 56977,58 kW pada 20°C, dan 56267,78 kW pada 21°C. Nilai irreversibilitas tersebut menunjukkan bahwa nilai irreversibilitas sistem akan menurun seiring dengan meningkatnya suhu lingkungan.

Berbeda dengan pengaruh suhu lingkungan terhadap efisiensi eksergi *overall* pada sistem. Efisiensi eksergi *overall* pada gambar 4.4 menunjukkan bahwa nilai efisiensi eksergi *overall* pada sistem akan meningkat seiring dengan meningkatnya suhu lingkungan, sehingga dari ketiganya dapat diketahui bahwa hubungan antara irreversibilitas dengan efisiensi eksergi *overall* yaitu berbanding terbalik seiring dengan meningkatnya suhu lingkungan yang mempengaruhi sistem.

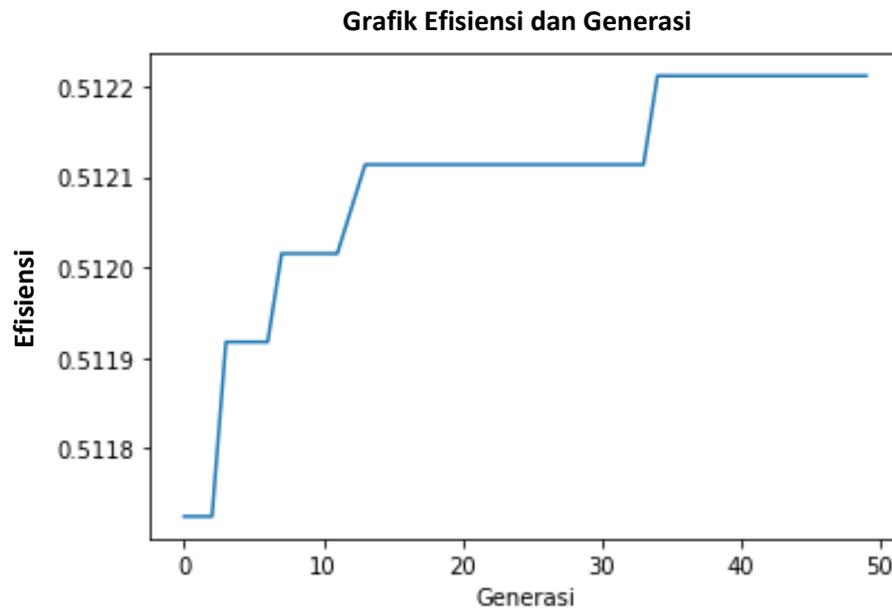
4.3. Optimasi Tekanan *Wellhead* dan *Inlet Turbine* dengan Metode *Genetic Algorithm*

Optimasi tekanan *wellhead* dan *inlet turbine* dilakukan menggunakan *software Google Colabs* yang tersedia secara gratis di *Google*. Tujuan dari optimasi ini yaitu untuk menaikkan nilai efisiensi eksergi *overall* pada sistem dengan mengubah besarnya variabel agar sistem lebih optimal. Variabel yang digunakan yaitu pada tekanan *wellhead* dengan nilai *constraint* sebesar 11 – 13 bar dan tekanan pada *inlet turbine* dengan nilai *constraint* sebesar 10 – 11.5 bar.

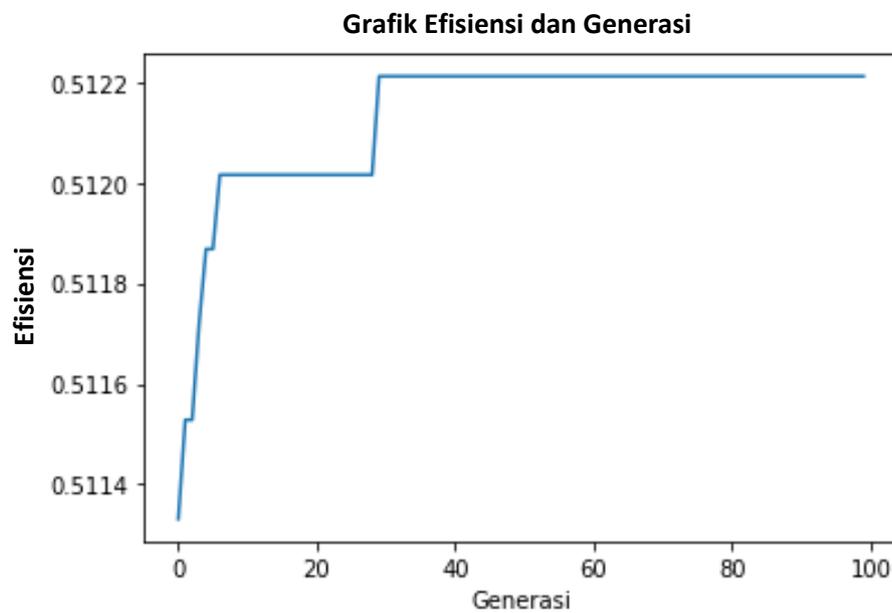
Optimasi dilakukan dengan menggunakan nilai populasi 50, probabilitas *crossover* 80%, dan probabilitas mutasi sebesar 10%. Banyaknya iterasi yang dilakukan pada optimasi ini digunakan berbagai jumlah iterasi untuk menentukan nilai yang konvergen. Hasil dari berbagai jumlah iterasi ditunjukkan pada gambar 4.6, gambar 4.7, dan gambar 4.8 yang menyatakan sumbu Y pada grafik sebagai nilai efisiensi *overall* dan sumbu X menyatakan banyaknya iterasi.



Gambar 4.6 Optimasi dengan 20 kali iterasi



Gambar 4.7 Optimasi dengan 50 kali iterasi



Gambar 4.8 Optimasi dengan 100 kali iterasi

Hasil optimasi dengan berbagai jumlah iterasi ditunjukkan pada gambar 4.5, gambar 4.6, dan gambar 4.7 sehingga dapat diketahui pada grafik optimasi dengan jumlah iterasi yang banyak yaitu lebih konvergen dibandingkan iterasi dengan

jumlah sedikit. Proses iterasi pada prinsipnya adalah tahap penggantian dimana keturunan hasil seleksi, rekombinasi, dan mutasi yang menghasilkan populasi induk hingga mendapatkan nilai kecocokan yang baik (*best fitness*). Adapun hasil optimasi pada 100 kali iterasi pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

Tabel 4.5 Data hasil optimasi

Optimasi	P <i>wellhead</i> (bar)	P <i>inlet turbine</i> (bar)	Efisiensi Overall (<i>fitness</i>)
1	11.91	10.105	0.5112
2	11.82	10.128	0.5106
3	11.65	10.023	0.5100
4	11.90	10.012	0.5116
5	11.95	10.035	0.5118
6	11.98	10.082	0.5118
7	11.90	10.105	0.5113
8	11.98	10.012	0.5121
...	11.91	10.011	0.5117
100	11.98	10.023	0.5122

Berdasarkan tabel 4.6 hasil optimasi didapatkan nilai variabel optimum pada tekanan *wellhead* dan *inlet turbine* masing-masing sebesar 11,98 bar dan 10,023 bar. Kenaikan tekanan tersebut menyebabkan nilai entalpi pada sistem tersebut naik. Sehingga berpengaruh ke nilai eksergi serta irreversibilitas pada sistem.

Nilai irreversibilitas total pada sistem mengalami penurunan setelah dilakukannya optimasi dan perhitungan ulang pada analisis eksergi. Penurunan irreversibilitas terjadi sebesar 28,543 kW yakni berasal dari total irreversibilitas sistem sebesar 58297,658 kW setelah optimasi dikurangi dengan total irreversibilitas sistem sebesar 58326,201 kW sebelum optimasi. Hal tersebut berpengaruh juga terhadap nilai W_{nett} serta nilai efisiensi eksergi *overall*. Nilai efisiensi eksergi *overall* setelah optimasi yaitu sebesar 51,22%. Kenaikan efisiensi eksergi *overall* tersebut terjadi sekitar 0,11%.

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4 dapat disimpulkan sebagai berikut ini:

- a. Analisis energi hanya menunjukkan nilai laju energi pada setiap komponen PLTP, sedangkan analisis eksergi menunjukkan nilai dan letak terjadinya irreversibilitas serta nilai efisiensi eksergi dari keseluruhan sistem. Adapun nilai irreversibilitas terbesar terletak pada komponen *turbine* dan *main condensore* dengan nilai masing-masing sebesar 21693.890 kW dan 21688.148 kW. Total irreversibilitas dari semua sistem yaitu 58326.201 kW sedangkan total eksergi masuk sistem sebesar 119308.457 kW, sehingga didapat nilai efisiensi eksergi *overall* sebesar 51,11%.
- b. Pengaruh suhu lingkungan terhadap irreversibilitas dan efisiensi eksergi *overall* menunjukkan bahwa nilai irreversibilitas dengan efisiensi eksergi *overall* berbanding terbalik siring dengan meningkatnya suhu lingkungan yang mempengaruhi sistem.
- c. Optimasi dengan metode *genetic algorithm* pada tekanan *wellhead* dan *inlet turbine* dengan nilai *constraint* masing-masing 11 – 13 bar pada *wellhead* dan 10 – 11.5 bar pada *inlet turbine* menghasilkan peningkatan pada nilai efisiensi eksergi *overall* sebesar 0,11% yaitu dari 51,11% menjadi 51,22%.

5.2. Saran

Hal yang dapat disarankan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Perawatan pada setiap komponen maupun sistem PLTP perlu dilakukan guna untuk mengurangi terjadinya irreversibilitas terutama pada komponen yang memiliki irreversibilitas terbesar.
- b. Penelitian lanjutan pada optimasi PLTP PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang Unit 4 ini dapat dilakukan dengan optimasi pada komponen lain serta menggunakan metode selain *genetic algorithm* sebagai pembanding.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhitya, M.B. 2017. *Optimasi Proses Produksi pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Jenis Single-Flash dengan Metode Genetic Algorithm*. Thesis. Fakultas Teknologi Industri. Institut Teknologi Sepuluh November: Surabaya.
- Anwar, K., M.H. Basri, I.Tobe. 2013. *Analisis Eksergi pada Sistem Pembangkit Daya Tenaga Uap (PLTU) Palu*. Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII (SNTTM XII). Universitas Tadulako: Bandar Lampung.
- Balqis, E.R.D., K. Indriawati, B. Lelono. 2012. *Optimasi Daya Listrik pada PT Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang, Jawa Barat*. JURNAL TEKNIK POMITS Vol. 1, No. 1.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G. Dan Moran M. 1996. *Thermal Design and Optimization*. John Wiley and Sons Inc.400-493.
- Cengel, Y. A. and M. A. Boles. 2015. *Thermodynamic an Engineering Approach*. 8th Ed. New York: McGraw-Hill Education
- DiPippo, R. 2012. *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*. 3rd Ed. Waltham: Elsevier
- Hamdi, S. H. Dan E. Bahrudin. 2014. *Metode Penelitian Kuantitatif dalam Pendidikan*. Yogyakarta: Deepublish.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2019. *Outlook Energi Indonesia*. Jakarta: Pusat dan Informasi KESDM.
- Moran, M.J. dan H.N. Saphiro. 2006. *Termodinamika Teknik Edisi 5*, Erlangga, 370-380.
- PT. Pertamina Geothermal Energy. 2018. *Sejarah Perusahaan*. Tersedia di <http://pge.pertamina.com/Profile>. Diakses Desember 2019.
- [PGE] Pertamina Geothermal Energy. 2012. *Laporan Tahunan PT. Pertamina Geothermal Energy Tahun 2011*. Jakarta.
- Permadi, I., Subanar. 2010. *Penerapan Algoritma Genetika untuk Optimasi Penjadwalan Tebangan Hutan (Applying of Genetic Algorithm for Scheduling Optimization Cuts Away Forest)*. JUITA Vol. I Nomor 1.
- Rudiyanto, B. 2008. *Kajian Eksergi pada Mesin Pendingin Adsorpsi Intermitten menggunakan Pasangan Silicagel Methanol*. Thesis. Sekolah Pasca Sarjana Institut Pertanian Bogor
- Rudiyanto, B., I.A. Illah, N.A. Pambudi, C. Ceng. R. Adiprana, M. Imran, L.H. Saw, R. Handogo. 2017. *Preliminary Analysis of Dry-Steam Geothermal Power Plant by Employing Exergy Assessment Case Study in Kamojang*

Geothermal Power Plant, Indonesia. In Journal of Case Studies in Thermal Engineering, 10. P. 292-301.

Saptadji, N. 2012. *Teknik Panas Bumi.* Bandung (ID) : Institut Teknologi Bandung

Saptadji, N.M., 2013. *Sekilas tentang panas Bumi Indonesia.* Bandung, ITB.