



**OPTIMASI TEKANAN *WELLHEAD* BERDASARKAN ANALISIS
EXERGY PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI
KAPASITAS 60 MW**

SKRIPSI

Oleh

Musyarrofah

NIM 141910101003

PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS JEMBER

2018



**OPTIMASI TEKANAN *WELLHEAD* BERDASARKAN ANALISIS
EXERGY PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI
KAPASITAS 60 MW**

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Mesin (S1) dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

Musyarrofah

NIM 141910101003

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2018**

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Ayahanda Alm. Muhammad Husni dan Ibunda Djuhairiyah yang telah memberi dukungan motivasi, kasih sayang dan doa selama ini;
2. Kakak saya Dewi Sulaiha dan Mustofal Halim yang turut mendoakan hingga terselesaikannya skripsi ini;
3. Seluruh dosen, staf administrasi Fakultas Teknik Universitas Jember
4. Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Jember dan Banyuwangi;
5. Tawang Alun *Eco Car Team* Universitas Jember;
6. Keluarga Teknik Mesin 2014;
7. Seluruh keluarga M Solver di seluruh Indonesia dengan slogan kebanggaannya “Solidarity Forever”
8. Almamater Universitas Jember

MOTO

Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah keadaan suatu kaum, sehingga
mengubah keadaan yang ada pada diri mereka sendiri
(terjemahan QS Ar Ra'd ayat 11)¹

Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai kesanggupannya
(terjemahan QS Al Baqarah ayat 286)²

Berdoa (mintalah) kepadaku (Allah SWT), pastilah aku kabulkan untukmu
(terjemahan QS Al Mukmin ayat 60)³

¹ Departemen Agama Republik Indonesia. 1998. *Al-Qur'an dan Terjemahannya*. Semarang: PT Kumudasmoro Grafindo.

² Departemen Agama Republik Indonesia. 1998. *Al-Qur'an dan Terjemahannya*. Semarang: PT Kumudasmoro Grafindo.

³ Departemen Agama Republik Indonesia. 1998. *Al-Qur'an dan Terjemahannya*. Semarang: PT Kumudasmoro Grafindo.

PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Musyarrofah

NIM : 141910101003

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan skripsi yang berjudul “Optimasi Tekanan *Wellhead* Berdasarkan Analisis *Exergy* pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Kapasitas 60 MW” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika disebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada instansi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggungjawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 14 Mei 2018
Yang menyatakan,

Musyarrofah
NIM 141910101003

SKRIPSI

**OPTIMASI TEKANAN *WELLHEAD* BERDASARKAN ANALISIS
EXERGY PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI
KAPASITAS 60 MW**

Oleh

Musyarrofah

NIM 141910101003

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Agus Triono, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Pendamping : Hary Sutjahjono, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Optimasi Tekanan *Wellhead* berdasarkan analisis *Exergy* pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi 60 MW” karya Musyarrofah telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal : Senin, 14 Mei 2018

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji:

Dosen Pembimbing Utama,

Dosen Pembimbing Anggota,

Dr. Agus Triono, S.T., M.T.
NIP. 197008072002121001

Hary Sutjahjono, S.T., M.T.
NIP. 196812051997021002

Penguji I,

Penguji II,

Muh. Nurkoyim K., S.T., M.T.
NIP. 196911221997021001

Dr. R. Koekoeh K. W., S.T., M.Eng
NIP. 196707081994121001

Mengesahkan
Dekan,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M
NIP 196612151995032001

RINGKASAN

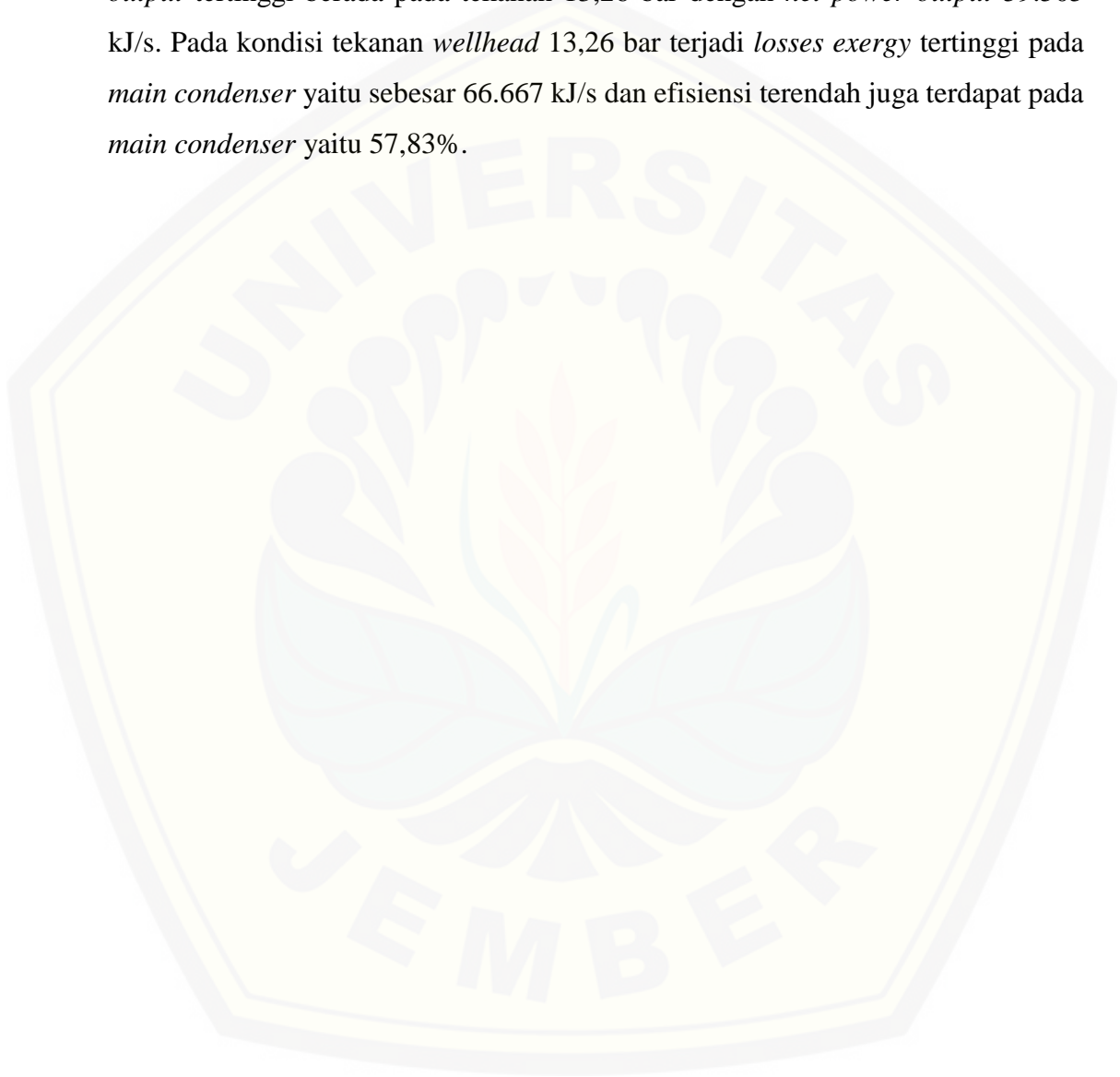
Optimasi Tekanan *Wellhead* berdasarkan analisis *Exergy* pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi 60 MW; Musyarrofah, 141910101003; 2018: 80 halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Kebutuhan energi listrik penduduk Indonesia semakin meningkat. Menurut data statistik konsumsi tenaga listrik PT PLN pada tahun 2015 mencapai 33.381,08 MW, meningkat 0,18 % dari tahun sebelumnya. Maka untuk dapat memenuhi kebutuhan tersebut diperlukan penggunaan energi alternatif seperti energi panas bumi. Di Indonesia salah satu pengembangan energi panas bumi berada di Kamojang. Kamojang memiliki 5 unit pembangkit dengan total pembangkitan 235 MW.

Kebutuhan energi yang terus meningkat maka diperlukan pemahaman mengenai penurunan kualitas pembangkit sehingga untuk memaksimalkan pembangkitan tenaga listrik maka dapat dilakukan analisis *exergy*. Analisis *exergy* dilakukan untuk mendapatkan gambaran mengenai besarnya kerugian dari suatu sistem, penyebab dan lokasi terjadinya *losses* terbesar di dalam sistem, sehingga untuk kedepannya dapat melakukan peningkatan pada setiap komponen-komponen pembangkit seperti turbin, *condenser*, *cooling tower* yang selama beroperasi lebih dari 10 tahun mengalami *losses*. Setelah diketahui dalam kondisi operasionalnya maka selanjutnya dilakukan optimasi tekanan *wellhead* untuk mengetahui tekanan *wellhead* yang menghasilkan efisiensi maksimal pada sistem. Penelitian ini dilaksanakan di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit 4 yang terletak di Desa Laksana, Kecamatan Ibum, Kabupaten Bandung, Jawa Barat.

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah kuantitatif deskriptif dengan penggunaan data *mass flow*, tekanan, temperatur pada setiap *state*, temperatur lingkungan, daya pembangkit listrik yang kemudian dihitung nilai entalpi, entropi pada setiap *state* dengan bantuan *software* EES (*Engineering Equation Solver*).

Analisis *exergy* yang telah dilakukan pada PLTP Kamojang Unit 4 memberikan informasi *losses exergy* terbesar pada *cooling tower* yaitu sebesar 371.741,36 kJ/s dan *efisiensi exergy* terendahnya terjadi pada *inter-condenser* yaitu sebesar 46,16. Sedangkan hasil optimasi tekanan *wellhead* menghasilkan *net power output* tertinggi berada pada tekanan 13,26 bar dengan *net power output* 59.505 kJ/s. Pada kondisi tekanan *wellhead* 13,26 bar terjadi *losses exergy* tertinggi pada *main condenser* yaitu sebesar 66.667 kJ/s dan efisiensi terendah juga terdapat pada *main condenser* yaitu 57,83%.



SUMMARY

WELLHEAD PRESSURE OPTIMIZATION BASED ON ANALYSIS EXERGY OF GEOTHERMAL POWER PLANT CAPACITY 60 MW; Musyarrofah, 141910101003; 2018: 83 pages; Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Jember University

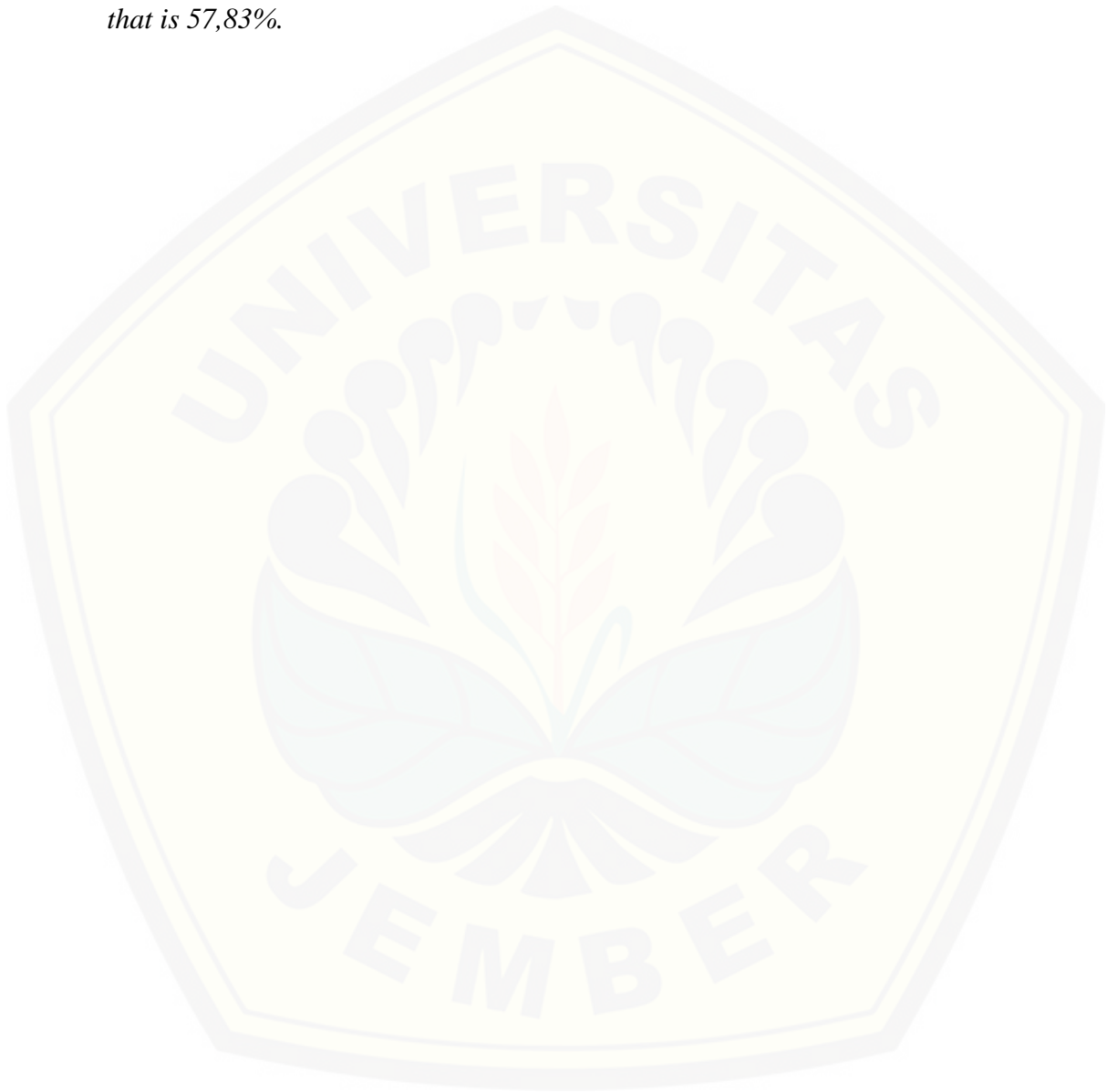
Electrical energy needs of Indonesia's population is increasing. Based on statistical data, the electricity consumption of PT PLN in 2015 reached 33,381,08 MW, an increase of 0.18% from the previous year. So to be able to meet these needs required alternative energy such as geothermal energy. In Indonesia one of the geothermal power plants is located in Kamojang. Kamojang has 5 generating units with a total generation of 235 MW.

The need for energy is increasing then needed an understanding of the decrease in the quality of the plant so that to maximize the generation of electricity it can be done exergy analysis. Exergy analysis is conducted to get an idea of the magnitude of losses of a system, the cause and location of the largest losses in the system, so that in the future it can improve every component of the power plant such as turbine, condenser, cooling tower during operation more than 10 years losses. Once it is known in operational conditions, then the optimization of wellhead pressure is applied to find the wellhead pressure that produces maximum efficiency in the system. This research was conducted at Geothermal Power Plant (PLTP) Kamojang Unit 4 located in Laksana Village, Ibum District, Bandung Regency, West Java.

The research method used in this research is quantitative descriptive by using mass flow data, tigrat, temperature at each condition, environmental temperature, electric power which then calculated, and each with the help of EES (Engineering Equation Solver) software.

The execution analysis that has been done on PLTP Kamojang Unit 4 provides information on the biggest exergy loss on cooling tower that is equal to 371.741,36 kJ s and the lowest interconnect efficiency occurs at inter-condensor

that is equal to 46,16. While the results of wellhead optimization produce the highest net power output at work 13,26 bar with net power output 59,505 kJ/s. At the wellhead condition of 13,26 bar, the highest execution loss in the main condenser is 66,667 kJ / s and the lowest efficiency is also found in main condenser that is 57,83%.



PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Optimasi Tekanan *Wellhead* berdasarkan analisis *Exergy* pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi 60 MW”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Ayahanda Alm. Muhammad Husni dan Ibunda Djuhairiyah yang telah memberi dukungan motivasi, kasih sayang dan doa selama ini sehingga saya bisa menyelesaikan studi hingga S1;
2. Kakak saya Dewi Sulaiha dan Mustofal Halim yang selalu memberikan doa dan semangatnya untuk saya;
3. Bapak Hari Arbiantara B., S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama 4 tahu saya menjadi mahasiswa;
4. Bapak Dr. Agus Triono, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama, dan Bapak Hary Sutjahjono, S.T, M.T. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu dan pikiran serta perhatiannya guna memberikan bimbingan dan pengarahan demi terselesaikannya skripsi ini;
5. Bapak Muh. Nurkoyim Kustanto, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji I dan Bapak Dr. Robertoes Koekoeh Koentjoro W., S.T., M.Eng. selaku Dosen Penguji II yang memberikan saran dan kritikan dalam penyusunan skripsi ini;
6. Keluarga seperjuangan Teknik Mesin 2014 yang sudah berjuang bersama dari masa mahasiswa baru sampai saat ini;
7. Teman terdekat Risma Laras Wati dan Koyyimatus Solehah Utami yang selalu ada untuk mendengarkan keluh kesah saya dan saling menyemangati sampai saat ini;

8. Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Jember dan Banyuwangi (KBMMJB), Forum Wilayah 7A Forum Mahasiswa Mesin Indonesia (FMMI) yang telah memperkenalkan mahasiswa teknik mesin se-Indonesia;
9. Keluarga Mahasiswa Mesin (KMM) Jabar dan Forum Komunikasi Teknik Mesin Jateng (FKTMJ) yang telah banyak membantu saya dalam mengerjakan skripsi ini;
10. Club Tawang Alun *Eco Car Team* yang telah berjuang bersama membanggakan almamater melalui lomba Kontes Mobil Hemat Energi (KMHE) setiap tahunnya;
11. Club *Mechanical Engineering Software* (MES) Teknik Mesin Universitas Jember yang telah memberikan ilmu tentang *software engineering*;
12. Club Bengkel Mahasiswa Mesin (BMM) Universitas Jember yang telah memberikan ilmu tentang otomotif;
13. Keluarga Paskibra Universitas Jember Tahun Akademik 2014/2015;
14. Seluruh staf pengajar dan administrasi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah memberikan ilmu, membimbing, dan membantu kelancaran saya selama perkuliahan;
15. Teman-teman beserta seluruh pihak yang tidak dapat penyusun sebutkan satu persatu yang telah membantu dalam pelaksanaan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, karena sempurna hanya milik Allah SWT. Harapan penulis adalah supaya informasi dari skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan pembaca.

Jember, 14 Mei 2018

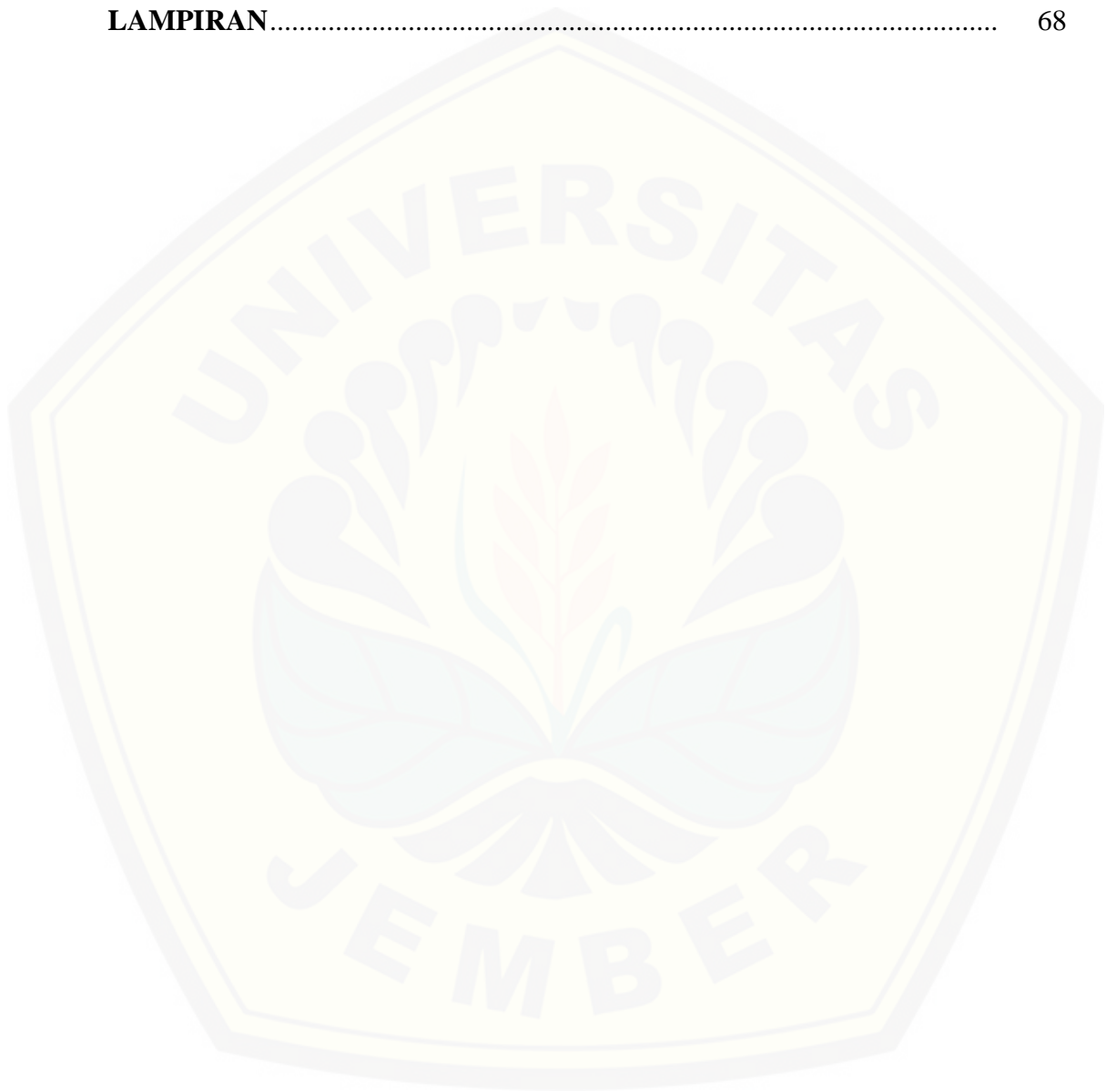
Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBING	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
SUMMARY	ix
PRAKATA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan dan Manfaat	3
1.4.1 Tujuan	3
1.4.2 Manfaat.....	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi	5
2.2 Jenis-jenis Sumur dan Rangkaiannya	7
2.3 Prinsip Kerja Pengoperasian PLTP	9
2.3.1 <i>Scrubber</i>	10
2.3.2 <i>Turbine</i>	11
2.3.3 <i>Main Condenser</i>	12

2.3.4	<i>Hot Well Pump (HWP)</i>	12
2.3.5	<i>Ejector</i>	13
2.3.6	<i>Inter-Condenser</i>	13
2.3.7	<i>Liquid Ring Vacuum Pump (LRVP)</i>	14
2.3.8	<i>Separator</i>	14
2.3.9	<i>Auxiliary Cooling Water Pump</i>	14
2.3.10	<i>Cooling Tower</i>	14
2.4	Properti Hukum Termodinamika	15
2.5	Konsep Kesenjangan Exergy	16
2.6	Konsep Kesenjangan Energi	21
2.7	Hipotesis	22
BAB 3.	METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1	Waktu Penelitian	23
3.2	Metode Penelitian	23
3.3	Flow Diagram PLTP Kamojang Unit 4	29
3.4	Flow Chart Penelitian	30
BAB 4.	PEMBAHASAN	31
4.1	Analisis Exergy Sistem PLTP Kamojang Unit 4	31
4.1.1	<i>Exergy pada Header</i>	32
4.1.2	<i>Exergy pada Scrubber</i>	34
4.1.3	<i>Exergy pada Turbine</i>	36
4.1.4	<i>Exergy pada Main Condenser</i>	39
4.1.5	<i>Exergy pada Ejector</i>	42
4.1.6	<i>Exergy pada Inter-Condenser</i>	45
4.1.7	<i>Exergy pada Liquid Ring Vacuum Pump (LRVP)</i>	47
4.1.8	<i>Exergy pada Separator</i>	49
4.1.9	<i>Exergy pada Cooling Tower</i>	50
4.1.10	<i>Exergy pada Pipe Line PLTP Kamojang Unit 4</i>	52
4.1.11	<i>Exergy pada Production Well PLTP Kamojang Unit 4</i> ..	54
4.2	Analisis Energi Sistem PLTP Kamojang Unit 4	59
4.3	Optimasi Tekanan Wellhead PLTP Kamojang Unit 4	60

BAB 5. PENUTUP	64
5.1 Kesimpulan	64
5.2 Saran	65
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN	68



DAFTAR GAMBAR

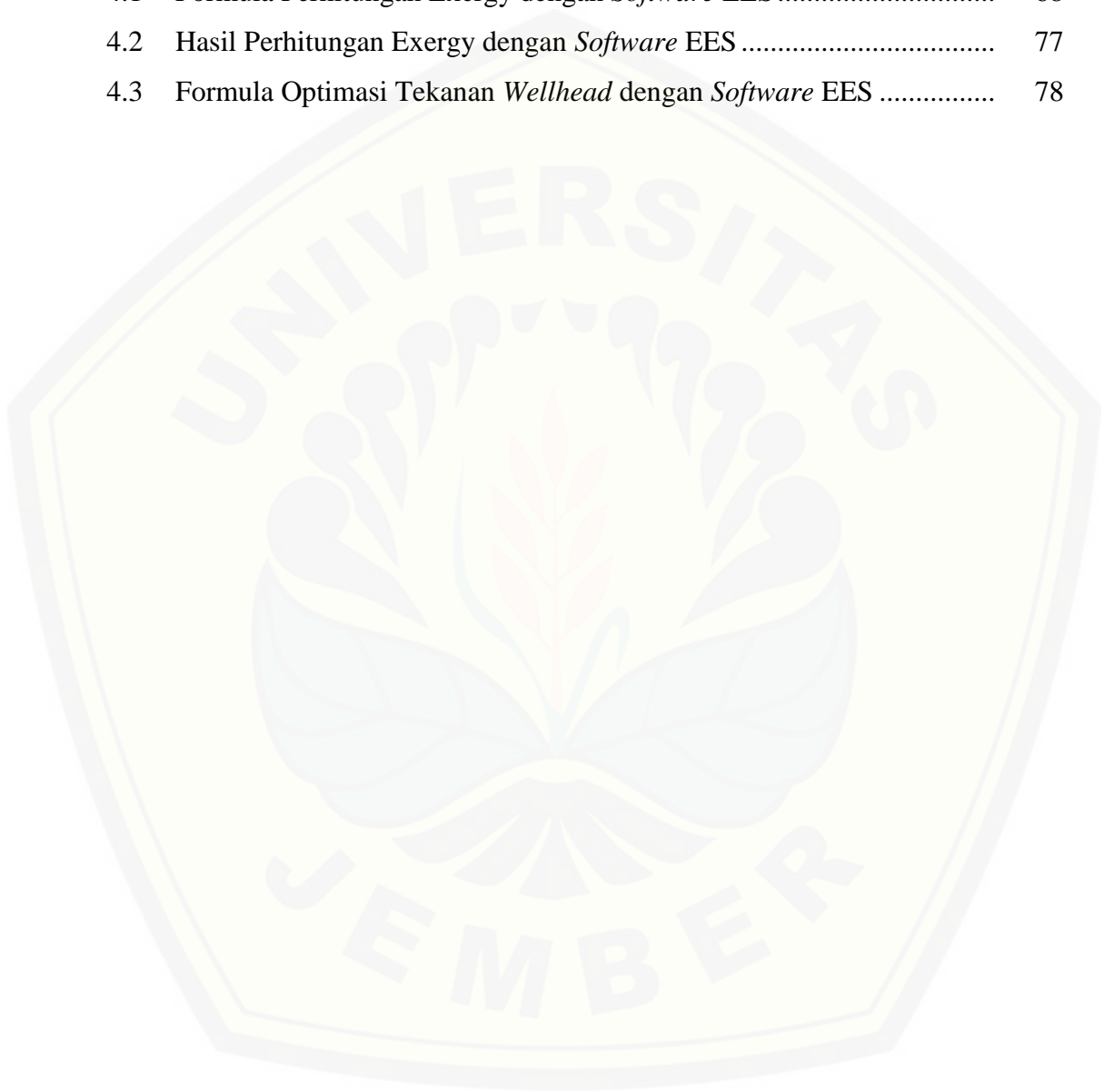
	Halaman
2.1 Skema representasi sistem panas bumi ideal oleh <i>International Geothermal Association</i>	5
2.2 Aliran <i>exergy</i> dalam sebuah <i>system</i>	18
3.1 Grafik <i>Dry steam productivity curve</i>	26
3.2 Diagram skematik optimasi tekanan <i>wellhead</i>	28
3.3 <i>Flow Diagram</i> PLTP Kamojang Unit 4.....	29
3.4 <i>Flow chart</i> Penelitian.....	30
4.1 Skema proses <i>Header</i>	33
4.2 Skema proses <i>Scrubber</i>	35
4.3 Skema proses <i>Turbine</i>	36
4.4 <i>Skema proses main condenser</i>	39
4.5 Skema proses <i>ejector</i>	42
4.6 Skema proses <i>Inter-Condenser</i>	45
4.7 Skema proses <i>Liquid Ring Vacuum Pump (LRVP)</i>	47
4.8 Skema proses <i>separator</i>	49
4.9 Skema proses <i>cooling tower</i>	50
4.10 Skema proses pipa injeksi.....	53
4.11 Grafik perbandingan <i>losses</i> dan efisiensi <i>exergy</i> setiap komponen pada kondisi operasional PLTP Kamojang Unit 4.....	55
4.12 Grafik <i>exergy</i> masuk dan <i>exergy</i> keluar dari setiap komponen pada kondisi operasional PLTP Kamojang Unit 4.....	56
4.13 Grafik perbandingan tekanan <i>wellhead</i> terhadap efisiensi <i>exergy</i> pada PLTP Kamojang Unit 4.....	61
4.14 Grafik perbandingan tekanan <i>wellhead</i> terhadap efisiensi <i>net power output</i> pada PLTP Kamojang Unit 4.....	61

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Spesifikasi <i>Turbine</i>	12
2.2 Perbandingan antara <i>Energy</i> dan <i>Exergy</i> dalam Suatu Sistem Termal...	22
3.1 Rumus <i>losses</i> , efisiensi <i>exergy</i> dan energi setiap komponen	24
4.1 Data operasional pada masing-masing state PLTP Kamojang Unit 4....	31
4.2 Data operasional <i>Header</i>	33
4.3 Data operasional <i>Scrubber</i>	35
4.4 Data operasional <i>Turbine</i>	37
4.5 Data operasional <i>main condenser</i>	40
4.6 Data operasional <i>Ejector</i>	42
4.7 Data operasional <i>Inter-Condenser</i>	45
4.8 Data operasional <i>Liquid Ring Vacuum Pump (LRVP)</i>	47
4.9 Data operasional <i>cooling tower</i>	50
4.10 Nilai <i>Exergy</i> pada Production Well PLTP Kamojang Unit 4.....	54
4.11 Nilai <i>exergy</i> masuk, <i>exergy</i> keluar, <i>losses exergy</i> dan efisiensi	54
4.12 Nilai entalpi, entropi dan energi pada setiap komponen PLTP Kamojang Unit 4.....	59
4.13 Optimasi tekanan <i>wellhead</i> PLTP Kamojang Unit 4.....	61
4.14 Kondisi optimum PLTP Kamojang Unit 4 berdasarkan analisis <i>exergy</i>	62
4.15 <i>Losses exergy</i> pada kondisi optimum PLTP Kamojang Unit 4 berdasarkan analisis <i>exergy</i>	63
5.1 Hasil perhitungan <i>losses exergy dan efficiency exergy</i> setiap komponen	64

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
4.1 Formula Perhitungan Exergy dengan <i>Software</i> EES	68
4.2 Hasil Perhitungan Exergy dengan <i>Software</i> EES	77
4.3 Formula Optimasi Tekanan <i>Wellhead</i> dengan <i>Software</i> EES	78



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jumlah penduduk Indonesia terus meningkat, seiring dengan kondisi tersebut maka kebutuhan energi juga meningkat, termasuk konsumsi energi listrik. Dalam memenuhi kebutuhan listrik nasional, penyedia tenaga listrik tidak hanya dilakukan oleh PT PLN (Persero) melainkan dilakukan juga oleh pihak swasta yaitu *Independent Power Producer (IPP)*, *Private Power Utility (PPU)* dan Izin Operasi (IO) non bahan bakar minyak (Non BBM). Berdasarkan data *Outlook Energy Indonesia 2016* konsumsi listrik dalam kurun waktu 2000-2014 mengalami pertumbuhan rata-rata 6,8% per tahun. Pada tahun 2014 rasio elektrifikasi nasional sebesar 84% atau naik 3,9% dari tahun 2013, sedangkan tahun 2025 prediksinya 1.705/kapita dan pada tahun 2050 sebesar 3.668/kapita. Pada tahun 2014 produksi listrik mencapai 51,61 GW, terdiri dari 76% (PLN), 15% (IPP), 9% (PPU dan IO), sedangkan prediksi tahun 2050 mencapai 124 GW dan tahun 2015 mencapai 307 GW atau tumbuh 5,1 % per tahun. Diperlukan bauran dari penggunaan energi terbarukan untuk dapat memenuhi target tersebut. Energi terbarukan banyak macamnya, salah satunya adalah panas bumi (Dewan Energi Nasional, 2016).

Potensi energi panas bumi untuk pembangkit listrik di Indonesia diperkirakan sebesar 29 GW, hampir setara dengan total pasokan listrik nasional saat ini. Menurut badan Geologi (2010), bahwa Indonesia baru mengembangkan energi panas bumi untuk pembangkit listrik sebesar 1.189 MW (4,3%) dan berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral 2015 pada tahun 2014 terpasang tenaga listrik energi panas bumi dengan kapasitas 1405 MW, sedangkan potensi energi panas bumi untuk pembangkit listrik di Kamojang sebesar 235 MW dan pada pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) unit 4 Kamojang sebesar 60 MW.

Selama beroperasi lebih dari 10 tahun, komponen-komponen PLTP mengalami penurunan efisiensi yang diakibatkan oleh terjadinya *losses* selama proses, maka upaya untuk dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada pembangkit listrik dapat dilakukan dengan analisis *exergy*. *Exergy* adalah kerja maksimum teoritis yang dapat digunakan untuk melakukan kerja, yang didapat dari

selisih antara sistem dan lingkungannya sehingga didapatkan keadaan yang setimbang dengan lingkungannya. Analisis *exergy* merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengetahui efisien atau tidak efisiennya dalam penggunaan suatu energi. Melakukan analisis *exergy* pada sistem pembangkit listrik tenaga panas bumi maka akan mengetahui lokasi kerugian *exergy* dari masing-masing komponen (Santoso, 2012).

Saat ini telah banyak usaha yang dilakukan para peneliti yang menganalisis *exergy* di sistem pembangkit listrik pada perusahaan pembangkit listrik untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada pembangkit listrik. Salah satunya oleh Pambudi, et al, 2013 yang menganalisis *exergy* di PT Geodipa. Berdasarkan hal tersebut penelitian ini akan fokus melakukan analisis *exergy* pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Unit 4 Kamojang dengan simulasi pada tekanan *wellhead* berdasarkan analisis *exergy* yang telah dihitung. Hal ini untuk mengetahui besarnya tekanan *wellhead* dengan efisiensi *exergy* dan *net power output* yang maksimal.

1.2 Rumusan Masalah

Suatu sistem termal kita ketahui tidak ada yang memiliki efisiensi 100%. siklus *renkine* terjadi efisiensi maksimum pada sebuah mesin saat temperatur dan entropi tertentu. Adanya pembuangan kalor ke lingkungan yang merupakan proses *irreversible* dapat menurunkan efisiensi dari suatu sistem. Hal ini berarti kalor yang diinput di awal sistem tidak akan bisa dirubah semuanya menjadi kerja, maka akan ada *losses* energi pada sistem tersebut.

Hal tersebut sama dengan kondisi di pembangkit listrik tenaga panas bumi. Potensi uap panas bumi tidak dapat semuanya dikonversi menjadi energi listrik. Parameter yang dapat digunakan untuk mengetahui besarnya energi listrik yang dihasilkan adalah dengan mengetahui efisiensi termalnya. Mengidentifikasi efisiensi termalnya dapat diketahui dengan melakukan analisis *exergy*, maka dengan melakukan analisis *exergy* akan didapatkan gambaran mengenai besarnya *losses*, penyebab terjadinya *losses* dan lokasi *losses* terbesar dari suatu sistem.

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) memiliki sumur yang jumlahnya banyak hal ini untuk dapat menyuplai uap ke PLTP. Kamojang memiliki sekitar 90 sumur namun hanya digunakan 12 sumur untuk menyuplai PLTP Kamojang Unit 4. Dengan banyaknya jumlah jumlah sumur maka lebih bebas memilih sumur yang akan menyuplai PLTP untuk itu perlu diketahui tekanan *wellhead* yang cocok untuk menghasilkan efisiensi yang maksimal pada sistem. Dengan mengambil PLTP Kamojang Unit 4 sebagai sistem termal, maka penelitian ini akan fokus menganalisis *exergy* pada komponen-komponen utama yang terpasang pada sistem pada kondisi operasional dengan mempertimbangkan tekanan *wellhead* yang akan digunakan sebagai penyuplai sistem tersebut.

1.3 Batasan Masalah

Batasan dalam penelitian ini adalah:

- a. Pembangkit listrik yang dianalisis adalah PLTP Kamojang Unit 4
- b. Temperatur lingkungan 17 °C
- c. Tekanan lingkungan 0,85 bar
- d. Analisis *exergy* hanya dilakukan pada komponen utama yang terpasang PLTP Kamojang Unit 4
- e. Untuk menghitung *exergy* dan simulasi tekanan *wellhead* dengan bantuan *software EES (Engineering Equation Solver)*
- f. Energi kinetik dan potensial diabaikan
- g. *Losses exergy* pada *exhaust scrubber* yang terdapat kondensat diabaikan karena kondensat akan dibuang ke *drain pit* terjadi bila kondensat yang ada di dalam scrubber melebihi batas levelnya, jadi *losses* tidak terjadi setiap saat
- h. *Exergy* pada HWP dan ACWP diabaikan

1.4 Tujuan dan Manfaat

1.4.1 Tujuan

Tujuan dilakukan penelitian ini adalah:

- a. Mengetahui *exergy losses* setiap komponen utama pada PLTP Kamojang Unit

- b. Mengetahui efisiensi *exergy* setiap komponen utama pada PLTP Kamojang Unit 4
- c. Mengetahui kondisi tekanan *wellhead* yang menghasilkan efisiensi *exergy* dan *net power output* yang maksimum

1.4.2 Manfaat

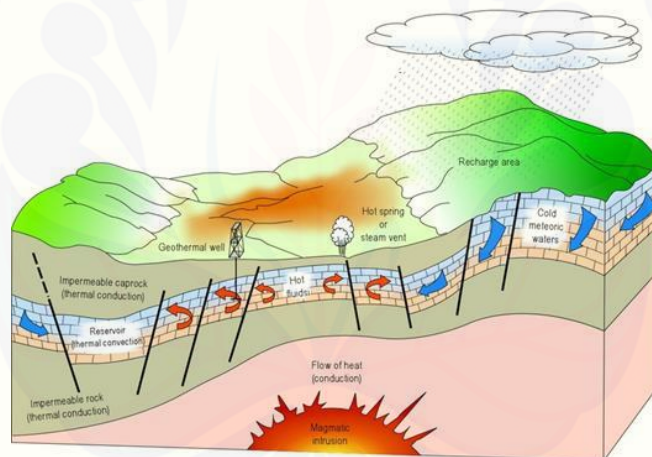
Manfaat dilakukan penelitian ini adalah:

- a. Sebagai wawasan tambahan untuk mengetahui *exergy losses* setiap komponen utama pada PLTP Kamojang Unit 4
- b. Sebagai wawasan tambahan untuk mengetahui efisiensi *exergy* setiap komponen utama pada PLTP Kamojang Unit 4
- c. Sebagai bahan pertimbangan untuk memilih *wellhead* yang digunakan sebagai penyuplai PLTP dan kedepannya dapat melakukan upaya peningkatan *performance* pada komponen yang terpasang pada PLTP Kamojang Unit 4

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi

Panas bumi lebih dikenal dengan sebutan geothermal. Kata *geothermal* berasal dari bahasa Yunani yaitu kata *geo* yang berarti bumi dan *thermal* yang berarti panas. Jadi panas bumi merupakan sumber daya panas yang terdapat dalam bumi yang merupakan hasil interaksi antara panas yang dipancarkan batuan panas dan air yang terdapat disekitarnya. Air yang terpanasi tersebut akan terperangkap di dalam batuan yang terletak dekat permukaan bumi sehingga dalam proses penghantaran panas bumi tersebut dapat berupa uap dan air *panas* yang tersimpan dalam suatu formasi batuan yang disebut reservoir (Armstead, 1983). Skema representasi panas bumi dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skema representasi sistem panas bumi ideal oleh *International Geothermal Association* (Sumber: Kana, 2014)

Area pengembangan *geothermal* biasanya berada di kawasan hutan lindung, maka untuk eksplorasinya tidaklah dalam skala besar. Selain itu biaya investasi awal yang besar serta rendahnya tarif pembelian listrik oleh PLN sehingga membuat pengembalian modal investasi awal sangat lama. Hal inilah yang menyebabkan tidak sebandingnya antara eksplorasi *geothermal* dengan potensi sumber daya energi panas bumi di Indonesia yang potensinya sangat besar.

Indonesia telah melakukan eksplorasi sumber energi panas bumi sejak tahun 1918 di kawasan kawah Kamojang. Upaya eksplorasi dimulai dengan

melakukan *survey* di wilayah Indonesia, *survey* tersebut dilakukan oleh Direktorat Vulkanologi dan Pertamina, Pemerintah Prancis dan Selandia Baru. Hasil *survey* tersebut dilaporkan bahwa Indonesia memiliki 217 wilayah potensi panas bumi (Masdi, 2014)

Jika dilihat dari sistem pembangkit, terdapat 3 jenis pembangkit listrik tenaga panas bumi yang dioperasikan di dunia, dimana setiap tempat memiliki jenis pembangkitnya sendiri menyesuaikan dengan kondisi uap daerah khususnya temperatur dan jenis uap yang diproduksi. Jenis-jenis pembangkit tersebut antara lain:

1) *Dry Steam Power Plant*

Pembangkit jenis *dry steam power plant* ini memanfaatkan langsung uap panas bumi untuk memutarakan turbin, hal ini dikarenakan uap dari sumur produksi sudah berupa uap kering. Uap dari turbin dikondensasikan menggunakan kondensor dengan air pendingin yang berasal dari cooling tower dan kondensat kembali didinginkan dengan menggunakan *cooling tower* lagi sebelum kondensat disirkulasikan kembali ke kondensor. Jadi kondensat dari kondensor dialirkan ke *cooling tower* jika jumlah air pendingin di *cooling tower* berada di bawah level minimumnya, sedangkan jika jumlah air pendingin di *cooling tower* telah melebihi level maka air kondensat akan dialirkan menuju sumur-sumur injeksi untuk diinjeksikan kembali ke reservoir. Pembangkit jenis ini merupakan pembangkit yang jarang ditemukan saat ini (Masdi, 2014).

2) *Flash Steam Power Plant*

Pembangkit *Flash Steam Power Plant* merupakan jenis pembangkit yang sering dioperasikan di dunia, karena jenis pembangkit ini dalam menghasilkan energi listrik berasal dari uap panas bumi dengan jenis *water dominated*. Jenis pembangkit ini dapat kita temui di Indonesia yaitu di PLTP Geo Dipa Energi, Dieng yang terletak di Jawa Tengah. Agar tetap bisa digunakan untuk memutarakan turbin, dalam sistem pembangkit dibuat *flash facility* semacam separator untuk memisahkan uap dan air. Uap yang berhasil dipisahkan tersebut kemudian digunakan untuk memutarakan turbin yang pada akhirnya akan menghasilkan energi

listrik, sedangkan air akan kembali diinjeksikan ke dalam bumi. Untuk pembangkit jenis ini dibutuhkan panas bumi dengan temperatur 350⁰F-500⁰F atau 177⁰C -260⁰C (Masdi, 2014).

3) *Binary Cycle Power Plant*

Pembangkit jenis ini mulai dikembangkan pada tahun 1980 untuk menghasilkan energi listrik dari uap panas bumi bertemperatur rendah, yakni berkisar antara 165⁰ -350⁰F (74⁰ -177⁰C). Dalam proses biner, fluida *geothermal* baik dalam bentuk air murni, uap murni, ataupun campuran keduanya akan memataskan fluida lain yang sering disebut sebagai fluida kerja (Masdi, 2014).

Fluida kerja ini memiliki karakteristik memiliki state didih dibawah state didih air, seperti *isopentane* atau *isobutane*. Proses perpindahan kalor antara fluida *geothermal* dan fluida kerja berlangsung di *heat exchanger*, dimana fluida kerja akan mengalami perubahan fase dari *liquid* menjadi uap setelah memperoleh kalor dari fluida geothermal. Setelah itu, uap dari fluida kerja akan memutarakan turbin yang pada akhirnya akan menghasilkan energi listrik seperti dua jenis pembangkit lainnya.pada akhirnya akan menghasilkan energi listrik seperti dua jenis pembangkit lainnya (Masdi, 2014).

2.2 Jenis-jenis Sumur dan Rangkaiannya

Sumur berdasarkan jenis penggunaannya terdapat tiga macam sumur. Yang pertama ada sumur produksi yang merupakan sumur dengan potensi yang baik. Setiap harinya di area sumur diperiksa oleh operator untuk diambil data *pressure* dan *temperature*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari setiap sumur dan nantinya akan diketahui *wellhead pressure* dari setiap sumur, kemudian juga diketahui *mass flow* dari setiap sumur.

Sumur monitoring merupakan sumur yang memiliki *mass flow* yang rendah dibandingkan sumur produksi. Sumur *monitoring* akan di *bleeding* dengan *steam* yang dibuang ke udara melalui *annulus*. Sumur monitoring berfungsi untuk *memonitoring* parameter-parameter reservoir sehingga mengetahui karakteristik *steam*.

Sumur injeksi merupakan sumur untuk menginjeksikan kondensat kedalam *reservoir*. Karena pada dasarnya tenaga panas bumi lebih tepatnya disebut *sustainable energy*. Disebut *sustainable energy* dikarenakan jika dieksplor secara terus menerus dan tidak dikelola dengan baik maka energi panas bumi juga akan dapat habis. Berdasarkan hal tersebutlah sumur injeksi digunakan untuk menjaga keberlangsungan fluida di dalam reservoir. Sumur injeksi dan saluran pipa injeksi berwarna hijau. Letak sumur injeksi tidaklah sama dengan sumur produksi. Diinjeksikannya air ke reservoir untuk menjaga keberlangsungan produksi uap yang dihasilkan.

Sumur-sumur yang berada di area Kamojang memiliki serangkaian *well head* yang terdiri beberapa macam komponen. serangkaian kepala sumur (*well head*) terdiri dari beberapa komponen yaitu:

a) *Master valve*

Master valve berfungsi untuk membuka atau menutup aliran uap yang akan dialirkan sistem serta mengisolasi cairan dari sumur ketika *open* sumur. *Master valve* setiap bulannya dilihat kondisinya dan dibersihkan oleh bagian pemeliharaan, sedangkan untuk memastikan bahwa uapnya mengalir, dilakukan pengambilan data oleh operator *control room*.

b) *Side Valve*

Side valve merupakan bagian dari kepala sumur yang berfungsi sebagai jalur pengalihan cairan uap. Salah satu sisi *side valve* digunakan untuk mengalirkan uap apabila sumur dinonaktifkan, yaitu *side valve* yang arahnya ke pipa *bleeding*. Sedangkan sisi *side valve* satunya diarahkan ke *pressure gauge* agar dapat diukur nilai dari tekanan kepala sumurnya.

c) *Wing Valve*

Wing valve berfungsi untuk mengatur aliran sesuai dengan jalurnya. *Wing valve* juga merupakan jenis *gate valve*. Sehingga fungsi *wing valve* pada saat produksi berfungsi untuk melindungi *master valve* dari perbedaan tekanan yang terlalu besar pada aliran di *pipeline* dengan tekanan kepala sumur. Sehingga seandainya terjadi sesuatu, maka *wing valve* yang akan terkena dampaknya dulu. Sehingga *master valve* aman.

d) *Bleeding Pipe*

Bleeding pipe merupakan pipa yang berfungsi untuk membuang gas – gas yang ada di kepala sumur. Uap – uap yang berasal dari kepala sumur akan dialirkan ke jalur transmisi melalui beberapa *pipeline*. Saat dialirkan pada *pipeline*, terdapat beberapa komponen untuk pengaliran uap tersebut seperti *pipeline*, *rock muffler*, *pressure gauge*, *temperature gauge*, *orifice*, *flow recorder*, *block valve*, *repture disk*, *drain port*, *steam trap*, *pipa loop*, *flow meter*.

e) *Annulus*

Annulus merupakan *master valve* yang dipasang pada saat sumur pertama kali eksplorasi sumur. *Annulus* berfungsi sebagai ruang penyedia pada pipa pengeboran sehingga ruang tersebut membuat sirkulasi tekanan aman. Hal ini dilakukan untuk mencegah ekspansi tekanan yang berlebihan (*blow out*) pada saat pertama kali *release*. Namun, tidak semua sumur memiliki *annulus*, hanya beberapa sumur saja yang memiliki *annulus*.

2.3 Prinsip Kerja Pengoperasian PLTP

Sistem PLTP Kamojang merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan tenaga panas bumi yaitu mengolah uap yang diperoleh dari reservoir bumi. Adanya perbedaan energi antara suhu permukaan bumi dengan tekanan dari bumi maka menyebabkan uap keluar menuju permukaan bumi.

Berikut komponen-komponen untuk transmisi uap yang menyalurkan uap dari sumur ke PLTP Kamojang Unit 4:

(1) *Pipa Uap*

Pipa adalah komponen untuk pendistribusian uap. *Pipa* ini terbuat dari *carbon steel* dengan diameter dan schedule tertentu. *Pipa uap* ini tersusun atas 4 lapisan. Pada bagian terdalan terdapat pipa yang terbuat dari baja lalu lapisan kedua terdapat kalsium silikat. Pada lapisan ketiga terdapat *fiber glass* dan aluminium foil untuk mencegah terjadinya korosi pada pipa dan *Pipa* terluar terbuat dari *carbon steel*.

(2) *Rock Muffler*

Rock Muffler merupakan suatu peredam suara pada sebuah sistem panas bumi. Uap yang keluar dari sumur memiliki suara bising dengan tingkat kebisingan yang melebihi ambang batas pendengaran manusia sehingga dapat mengganggu pendengaran manusia. Berdasarkan hal tersebutlah diredam dengan dipasangnya *rock muffler*. Bentuk fisik *rock muffler* berupa lubang yang diisi oleh susunan dari pecahan-pecahan batuan beraneka ragam. Instalasi *rock muffler* terbagi menjadi 2 jenis yaitu diatas tanah dan dibawah tanah.

(3) *Drain Port* dan *Steam Trap*

Kualitas uap perlu dijaga maka dipasang *Drain Port* dan *Steam Trap* untuk membuang kondensat di dalam pipa. *Drain port* merupakan rangkaian alat yang dipasang sepanjang jalur saluran pipa terutama pada bagian jalur pipa yang rendah untuk menjebak kondensat dan membuang ke luar pipa. *Drain port* terdiri dari *main hole, valve, steam trap, elbow, blow down* dan pipa.

(4) Pipa *loop* merupakan pipa yang digunakan untuk mengantisipasi efek pemuaiian pada pipa pada saat uap panas dari sumur dialirkan pada saat pertama kali dan untuk mengurangi *pressure drop*. Uap yang sangat panas itu dapat meregangkan pipa. Apabila tidak ada *loop* pipa akan mengalami stress dan dapat menyebabkan kerusakan pada jalur pipa. Maka dari itu perlu dibuat *loop* pipa agar peregangan pipa tidak membuat pipa yang meregang pecah.

Uap dari sumur produksi dialirkan ke *steam gathering sistem*, setelah itu uap melalui *line piping tranmission* dan pipa *loop* lalu uap mengalir hingga sampai ke komponen-komponen utama yang terpasang di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Kamojang Unit 4.

2.3.1 *Scrubber*

Uap yang telah melewati *flow* meter akan masuk ke *scrubber*. *Scrubber* berfungsi untuk memisahkan uap dengan partikel padat seperti silica padat, pasir dan partikel lainnya yang terbawa di dalamnya. Hal ini dilakukan untuk menghindari terjadinya erosi, vibrasi dan pembentukan kerak pada sudu maupun

nozzle turbin. Uap dari sumur tidak 100% uap kering namun masih ada kelembapan, yang harus dipisahkan sebelum memasuki turbin uap. Karena kelembapan sangat berbahaya ketika memasuki turbin dan dapat menyebabkan kerusakan pada turbin. meskipun ukuran kelembapan sangat kecil, karena tekanan dan kecepatan dapat menembus pori-pori dan menyebabkan kerusakan pada *blade* sehingga kelembapan harus dihilangkan atau dipisahkan terlebih dahulu (Faradis, 2014).

Prinsip kerja dari *scrubber* yaitu aliran uap diarahkan dan berputar menyebabkan gaya sentrifugal. Karena gaya angkat kecil, maka air akan dilempar ke dinding dan karena massa jenis air lebih besar dibandingkan uap maka air akan berada di bagian bawah scrubber dan apabila air di dalam scrubber telah melebihi levelnya maka nantinya air akan dibuang ke pembuangan (*drain pit*). Lalu uap akan naik ke atas dan dilewatkan pada kisi-kisi penampang yang sangat kecil sehingga *solid particle* akan terjebak dan uap menuju turbin uap dalam keadaan kering.

Sumur produksi aktif menghasilkan uap untuk dialirkan ke pembangkit listrik tenaga panas bumi. Untuk penyuplai di PLTP Kamojang Unit 4 disupply oleh 12 sumur. Pada umumnya setiap sumur memiliki tekanan yang berbeda, sedangkan tekanan dan kandungan air dalam uap yang akan melewati scrubber akan dikontrol dengan menggunakan LCV (*Level Control Valve*) dan PVC (*Pressure Control Valve*). Ketika tingkat kondensat pada uap yang akan lewat di *scrubber* melebihi batas yang ditentukan, maka LCV akan terbuka dan brine akan dibuang ke silincer.

Uap yang berasal dari scrubber ada beberapa yang dibuang ke *rock muffler* sehingga tekanan yang terjaga dan sisanya pergi ke turbin uap. Saat kondisi penerimaan dari turbin dikendalikan oleh katup *stop main valve* dan *control valve*. Ketika uap memutar sudu-sudu turbin, maka saat itu energi panas bumi diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran pada poros turbin yang dikopel dengan generator sehingga menghasilkan gaya-gaya listrik.

2.3.2 Turbine

Uap yang telah difilter melalui *Scrubber* akan melewati *Strainer*. *Strainer* akan menjebak partikel yang akan merusak turbin uap. Jalur uap utama ke *Turbine* juga dilengkapi alat ukur tekanan dan suhu sebagaimana juga dilengkapi dengan

Turbine-stop valve dan *control valve* yang dioperasikan secara hidrolis. Turbin uap yang digunakan merupakan unit *double flow*, memiliki dua jalur uap masukan. *Turbine* ini secara langsung dikopel ke generator dan *exciter*, serta memiliki sistem hidrolis dan pelumasan sendiri. Lalu *steam* dialirkan melalui *stop valve* dan *control valve* menuju ke *Turbine* dan memutar sudu *Turbine* yang dikopel dengan generator. Berikut spesifikasi *Turbine* yang digunakan untuk PLTP Kamojang Unit 4 dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi *Turbine*

<i>Type</i>	<i>Single casing double flow condensing type</i>
<i>Rated Output</i>	<i>63,00 kJ/s</i>
<i>Inlet Steam Pressure</i>	<i>11,0 bar a</i>
<i>Inlet Steam Temperature</i>	<i>184,07°C</i>
<i>Exhaust Pressure</i>	<i>0,16 bar a</i>
<i>Rated Speed</i>	<i>3.000 rpm</i>
<i>Direction of Rotation</i>	<i>Clockwise (view from generator side)</i>
<i>Number of Blading Stage</i>	<i>Reaction Stage 12x2 flow</i>

2.3.3 Main Condenser

Main Condenser adalah suatu alat untuk mengkondensasikan uap dari *Turbine* dengan kondisi tekanan yang *vacuum*. *Exhaust steam* dari *Turbine* masuk dari sisi atas kondensator, kemudian terkondensasi sebagai akibat penyerapan panas oleh air pendingin yang diinjeksikan oleh *spray-nozzle*. Kondensat dari *Main Condenser* akan dipompakan oleh *Hot Well Pump* ke *Cooling Tower* untuk didinginkan ulang sebelum disirkulasikan kembali ke kondensator. Dimana level kondensat dijaga selalu dalam kondisi normal oleh *hot well pump* lalu didinginkan kembali di *cooling tower* sebelum disirkulasikan kembali.

2.3.4 Hot Well Pump (HWP)

Kondensat dari *main condenser* yang menuju *cooling tower* dialirkan oleh dua pipa yang berada di bagian bawah *main condenser*. Posisi *cooling tower* yang ketinggiannya di atas pipa output membutuhkan sebuah motor pompa untuk

mengangkut air dari kondenser menuju *cooling tower*. Fungsi tersebut dilakukan oleh dua buah *hot well pump* pada masing-masing pipa.

Sistem *hot well pump* memakai sistem *by pass*. Sistem ini digunakan ketika *start-up* kondenser, dimana sebelum air mencapai level tertentu didalam kondenser maka aliran output dari *hot well pump* akan di balikkan kembali atau *by pass* dengan menutup *valve output* dari *hot well pump* hingga mencapai level air yang di tentukan. Ketika level air yang ditentukan telah tercapai, *valve* akan terbuka dan kerja secara otomatis untuk mengatur keluaran air dari kondenser. Dan sistem penyaluran air dari *main condenser* ke *cooling tower* ketika volume kondensat yang ada di *cooling basin* telah melewati batas 1400. Maka kondensat akan di injeksikan ke KMJ-21. Jenis *valve* yang digunakan adalah *jenis spring return actuator* dan *butterfly valve*.

2.3.5 Ejector

Ejector merupakan komponen utama dari *gas removal system* di PLTP Kamojang Unit 4. Gas yang tak terkondensasi aatau yang biasa disebut non-condesible gas yang berasal dari *exhaust Turbine* harus dikeluarkan untuk menjaga kevakuman *condenser*. Gas-gas yang tak terkondensasi ini mengandung molekul CO₂, H₂S, N₂ dan gas gas lainnya harus dikeluarkan dari sistem dan dibuang ke atmosfer. PLTP Kamojang Unit 4 memiliki 3 buah ejector yaitu EJ-301A (65%), EJ-301B (35%) dan EJ-301C (25%) sebagai cadangan. Selanjutnya gas tak terkondensasi akan dibuang dari *inter-condenser* melalui sebuah *loop seal* dan kemudian akan mengalir kembali ke *main condenser*.

2.3.6 Inter Condenser

Inter kondenser berfungsi untuk memisahkan udara dan NCG yang bisa merusak sistem. NCG yang masuk ke inter kondenser akan dikondensasikan dengan air pendingin. Pada *inter condenser* terjadi pengkondensasian uap dengan metode *direct contact*. Hasil uap yang terkondensasikan akan dialirkan menuju *main condenser* menggunakan metode *lube seal*. Hal ini untuk menjaga tekanan agar

kevakuman *condenser* tetap terjaga. Dan kondensat juga kembali dialirkan menuju *main condenser* melalui sistem *lube seal*.

2.3.7 *Liquid Ring Vacuum Pump (LRVP)*

Liquid Ring Vacuum Pump (LRVP) berfungsi untuk memompa NCG dan kondensat lalu di transfer kembali ke Separator untuk membuang NCG ke atmosfer. LRVP disuplai dengan air pendingin dari *sealing*. Kemudian kondensat dan gas yang tidak mampu dikondensasikan akan ditansfer kembali ke *separator*.

2.3.8 *Separator*

Pada *separator* terjadi proses pengkondensasian tingkat akhir, kondensat yang dipakai untuk spray uap masih berasal dari sistem yang sama dengan *inter-condenser* yaitu didapat dari *cooling basin* yang dipompakan oleh ACWP. Dan kondensat kembali dialirkan menuju *main condenser* melalui sistem *lube seal*. Sedangkan gas tak terkondensasi akan dibuang ke atmosfer.

2.3.9 *Auxiliary Cooling Water Pump (ACWP)*

Kondensat yang telah turun suhunya sekitar 26 °C yang terdapat di basin *Cooling Water* akan disirkulasikan kembali menggunakan *Auxiliary Cooling Water Pump (ACWP)*. Kondensat digunakan untuk proses pengkondensasian pada Main Condenser, Inter Condenser dan dialirkan ke seal vacuum pum serta untuk mendinginkan komponen lainnya. ACWP yang terpasang di PLTP Unit 4 terdapat dua buah yang salah satu bekerja *stand by*.

2.3.10 *Cooling Tower*

Cooling tower berfungsi sebagai sistem penghasil air yang akan digunakan untuk proses kondensasi pada condenser dan air di *cooling tower* juga untuk menurunkan temperature peralatan lainnya, dengan prinsip penyerapan energy panas dari air yang disirkulasikan dengan cara mengalirkan udara pendingin menggunakan *fan* secara paksa dengan arah tegak lurus. Air yang berasal dari kondenser disemprotkan dari bagian atas menara pendingin. Selanjutnya air

tersebut jatuh dan berubah menjadi partikel-partikel yang lebih kecil karena terkena bagian penghalang (*fill*) disepanjang jalur terjatuhnya air. Udara dari lingkungan dimasukkan dari sisi samping bagian bawah menara pendingin menuju ke atas. Saat udara kontak dengan air, terjadi proses perpindahan panas. Udara tersebut mengangkat sejumlah air sehingga terjadilah proses penguapan sehingga temperatur air mengalami penurunan.

2.4 Properti Hukum Termodinamika

Analisis *exergy* pada PLTP dapat didasarkan pada hukum termodinamika. Hukum pertama termodinamika mengatakan bahwa energi sejumlah kalor (Q) yang diterima dan usaha (W) yang dilakukan terhadap suatu gas dapat digunakan untuk mengubah energi dalam. Hukum pertama termodinamika dapat ditulis dalam persamaan berikut:

$$\Delta U = Q - W \dots\dots\dots (1)$$

Persamaan diatas menjelaskan bahwa kalor (Q) yang masuk ke sistem maka bertanda positif ($+Q$) dan apabila kalor (Q) yang keluar dari sistem maka akan bertanda negatif ($-Q$). Namun sebaliknya pada kerja (W) apabila sistem tersebut menerima kerja maka bertanda negatif ($-W$), dan apabila sistem keluar tersebut melakukan kerja maka akan bertanda positif ($+W$). Jadi perubahan energi dalam (ΔU) tidak bergantung terhadap proses perubahan pada sistem melainkan bergantung terhadap keadaan awal dan keadaan akhir sistem tersebut (Moran, 2007).

Hukum kedua termodinamika mengatakan bahwa tidak mungkin ada sebuah proses yang hasilnya hanya menyerap panas dari reservoir pada satu suhu dan mengubah seluruh panas ini menjadi usaha mekanik. Berikut properti termodinamika sebagai acuan untuk perhitungan *exergy* :

1. *Temperature* (T)

Temperature merupakan besaran yang menunjukkan derajat panas suatu benda. Alat ukur yang digunakan untuk mengukur suhu disebut *thermometer*. *Temperature* dinyatakan dalam satuan celcius ($^{\circ}C$), kelvin (K) ataupun fahrenheit ($^{\circ}F$) (Illah, 2016).

2. *Pressure* (P)

Pressure merupakan gaya yang menekan fluida per satuan luas area. Pada fluida atau gas terdapat 3 macam tekanan yaitu:

- a. Tekanan atmosfer merupakan tekanan yang bergantung pada posisi ketinggian, temperatur, kelembapan udara dan faktor lainnya. Tekanan atmosfer akan selalu ada selama udara memiliki massa dan ada aksi dari gravitasi bumi (Illah, 2016).
- b. Tekanan *gauge* merupakan tekanan relatif atau tekanan suatu fluida yang ditunjukkan oleh alat ukur *temperature gauge*.
- c. Tekanan absolut merupakan tekanan total atau tekanan fluida sebenarnya. Dengan kata lain tekanan absolut sama dengan jumlah antara tekanan atmosfer dan tekanan *gauge* (Illah, 2016).

3. Entropi (S)

Entropi adalah sebuah besaran termodinamika yang berfungsi untuk menyatakan banyaknya energi yang tidak dapat digunakan untuk melakukan usaha. Entropi memiliki satuan kJ/kgK (Illah, 2016).

4. Entalpi (h)

Entalpi adalah istilah dalam termodinamika yang menyatakan jumlah energi yang dimiliki oleh suatu zat. Sama halnya dengan energi dalam (U), nilai absolut dari entalpi tidak dapat diukur, tetapi perubahan entalpi yang menyertai suatu sistem dapat ditentukan. Entropi memiliki satuan kJ/kg (Illah, 2016).

2.5 Konsep Kesetimbangan *Exergy*

Exergy 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). Dengan begitu kita akan mengetahui seberapa besar perbedaan antara sistem dari lingkungannya, jadi *exergy* merupakan suatu sifat dari sistem dan lingkungannya.

Metode analisis *exergy* dapat menunjukkan kualitas dan kuantitas kerugian panas serta lokasi pemusnahan *exergy* tersebut. Sebagian besar kasus

ketidaksempurnaan termodinamika tidak dapat dideteksi dengan analisis energi. Persamaan kerja aktual dan kerja *reversible* sering diformulasikan dalam persamaan fungsi *exergy* baik untuk sistem terbuka maupun sistem tertutup. Sampai saat ini dianggap penting untuk menentukan kerja potensial dari sebuah sistem menuju keadaan tertentu menuju kesetimbangan dengan lingkungan (Faradis, 2014).

$$E_{\text{destroyed}} = T_0 \cdot S_{\text{gen}} \dots\dots\dots (2)$$

$$E > 0 \text{ irreversible process} \dots\dots\dots (3)$$

$$E = 0 \text{ reversible process} \dots\dots\dots (4)$$

$$E < 0 \text{ imposible process} \dots\dots\dots (5)$$

Persamaan kesetimbangan *exergy* dalam sistem tertutup adalah sebagai berikut:

$$E_{\text{heat}} - E_{\text{work}} - E_{\text{destroyer}} = \Delta E_{\text{system}} \dots\dots\dots (6)$$

Persamaan kesetimbangan *exergy* dengan control volume adalah sebagai berikut:

$$E_{\text{heat}} - E_{\text{work}} - E_{\text{mass in}} - E_{\text{mass out}} - E_{\text{destroyed}} = (E_2 - E_1) \text{ cv} \dots\dots\dots (7)$$

Kesetimbangan *exergy* diatas mempunyai hubungan yaitu rata-rata dari perubahan *exergy* untuk mengontrol *volume* sehingga proses tersebut dapat dihitung rata-rata transfer energi bersihnya dalam lingkungan control volume dengan kalor dan laju aliran massa rata-rata dikurangi *exergy destroyed* dalam *boundary control volume* tersebut.

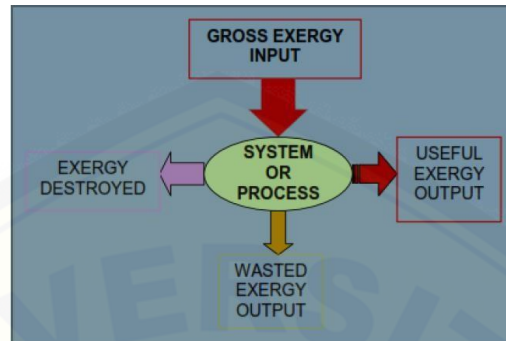
Kondisi awal dan kondisi akhir dari kontrol volume adalah :

$$E_2 - E_1 = m_2 \cdot E_2 - m_1 \cdot E_1 \dots\dots\dots (8)$$

Perubahan aliran *steady* dari *exergy* dalam sistem :

$$E_2 - E_1 = (h_2 - h_1) - T_0 (s_2 - s_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g (z_2 - z_1) \dots\dots\dots (9)$$

Untuk menghindari perbedaan dengan hukum thermodynamika, konsep *exergy* adalah untuk menggantikan massa dari semua yang dikonsumsi (shukuya and hamache, 2002).



Gambar 2.2 Aliran *exergy* dalam sebuah sistem (Kwanbai, 2005)

Gambar 2.2 konsep *exergy* memperlihatkan apa yang diperoleh dan apa yang digunakan dari konsumsi energi dalam proses transfer dan konversi energi yang berhubungan dengan kondisi lingkungannya. Untuk proses dalam kondisi *steady state*, kondisi-kondisi dari yang masuk sama dengan kondisi yang keluar. Hal ini dikarenakan konsep dari hukum thermodynamika (Cengel and Boles, 1994).

Perbedaan antara energi dan entropi dengan keseimbangan temperatur lingkungan yang dinamakan *exergy*, sementara berbagai macam temperatur lingkungan yang lebih tinggi dari entropi dinamakan konsumsi *exergy*. Berikut persamaan *exergy* dalam sistem tertutup tanpa aliran :

$$E = (U - U_0) + P_0 (V - V_0) - T_0 (S - S_0) + \frac{v^2}{2} + g Z \dots\dots\dots(10)$$

Berikut persamaan *exergy* dalam aliran fluida :

$$E = (h - h_0) + T_0 (s - s_0) - T_0 (S - S_0) + \frac{v^2}{2} + g Z \dots\dots\dots(11)$$

Dari keadaan hukum konservasi energi bahwa energi ke dalam sistem adalah sama untuk energi yang disimpan (*stored energy*) dan energi itu mengalir keluar dari sistem dapat di jabarkan dalam persamaan berikut :

$$\underline{\sum_{in} \dot{m}_i h_i} = \underline{\sum_{exit} \dot{m}_i h_i} \dots\dots\dots(12)$$

Energy in Energy out

Kemudian, dipertimbangkan persamaan entropi :

$$(\text{Entropy sign}) + (\text{Entropy generated}) = (\text{Entropy is stored}) + (\text{Entropy exit}) \dots\dots\dots(13)$$

Karena kondisinya adalah *steady stade*, maka tidak ada energi yang tersimpan, maka:

$$(\text{Entropy sign}) + (\text{Entropy generated}) = (\text{Entropy exit}) \dots\dots\dots(14)$$

$$\sum_{in} \dot{m}_i s_i + s_{gen} = \sum_{exit} \dot{m}_e s_e \dots\dots\dots(15)$$

$$(\text{Energy enter} - T_0 \times \text{entropy entrance}) - (T_0 \times \text{entropy raise}) = (\text{Energy out} - T_0 \times \text{entropy exit}) \dots\dots\dots(16)$$

$$(\sum_{in} \dot{m}_i h_i - T_0 \sum_{in} \dot{m}_i s_i) - (T_0 s_{gen}) = (\sum \dot{m}_e h_e - T_0 \sum_{in} \dot{m}_e s_e) \dots\dots(17)$$

Untuk aliran zat, *exergy flow* dapat di gambarkan dengan persamaan (Bejan, 1948):

$$E_{total} = E_{KE} + E_{PE} + E_{PH} + E_{CH} \dots\dots\dots(18)$$

Keterangan:

E_{KE} = energi kinetik

E_{PE} = energi potensial

E_{PH} = energi fisik

E_{CH} = energi kimia

Untuk energi keadaan fisika yang kita pertimbangkan adalah :

$$E_{PH} = m\varepsilon \dots\dots\dots(19)$$

E adalah *steam* (uap) yang tersedia atau uap dari energi dari persamaan diatas yaitu:

$$E = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) + \frac{v^2}{2} + g \dots\dots\dots(20)$$

Setelah mengabaikan energi kinetik dan potensi maka:

$$E = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \dots\dots\dots(21)$$

Exergy fisik selalu berkaitan dengan temperatur, entalpi dan entropi dari bahan dalam sistem tertutup, *exergy* fisik pada *state* tertentu dinyatakan dengan persamaan berikut (Bejan, 1948) :

$$E_{PH} = \dot{m}_i \cdot [(h_i - h_0) - T_0 (s_i - s_0)] \dots\dots\dots(22)$$

Keterangan:

- E_{PH} = *exergy* fisik (kJ/s)
- \dot{m}_i = laju aliran massa pada state i (kg/s)
- S_i = entropi pada state i (kJ/kg.K)
- S_0 = entropi pada state i (kJ/kg.K)
- h_0 = entalpi lingkungan (kJ/kg)
- h_i = entalpi pada state i (kJ/kg)
- T_0 = entalpi lingkungan ($^{\circ}$ C)

Kemudian dapat ditentukan nilai *exergy losses* pada tiap-tiap sub sistem menggunakan persamaan berikut :

$$E_{loss} = E_{input} - E_{output} \dots\dots\dots(23)$$

Dimana :

- E_{loss} = *losses exergy* (kJ/s)
- E_{input} = *exergy input* (kJ/s)
- E_{output} = *exergy output* (kJ/s)

Performa dari transfer rata-rata *exergy* adalah ditentukan oleh kapan masuk dan keluar dari *control volume*. *Exergy* yang baru masuk dan keluar dapat dimasukkan, asosiasi *exergy* dengan *heat transfer*, *exergy* juga berhubungan terhadap aliran zat ketika masuk dan keluar bagian sama seperti *throttle control valve* atau *heat exchanger*.

Konsep dari efisiensi akan digunakan dalam studi kali ini karena ukuran performa sistem dapat digambarkan pada persamaan berikut :

$$\eta = \frac{\Sigma E_{out}}{\Sigma E_{in}} \dots\dots\dots(24)$$

Dimana:

ΣE_{out} = jumlah *exergy output* yang diinginkan

ΣE_{in} = jumlah *exergy input* yang diperlukan

2.6 Konsep Keseimbangan Energi

Hukum termodinamika pertama menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan, energi hanya dapat dirubah dalam bentuk energi lainnya. Hukum termodinamika pertamadapat diformulasikan dalam bentuk *energy balance*, seperti berikut:

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{n_{system}} \dots\dots\dots(25)$$

Energi input dan energi output disebut sebagai transfer energi. Tranfer energi dapat dilakukan dengan tiga cara yaitu *heat transfer* (Q), *work transfer* (W) dan *mass flow* (*m*). Sedangkan pada sistem tertutup transfer energi dapat dilakukan dengan *heat transfer* atau *work transfer*. Maka formula *energy balance* untuk sistem tertutup sebagai berikut:

$$Q - W = \Sigma_{out} \dot{m}. h - \Sigma_{in} \dot{m}. h \dots\dots\dots(26)$$

Keterangan:

E_{in} = *energy input* (kJ/s)

E_{out} = *energy output* (kJ/s)

Q = kalor input (kJ/s)

W = kerja output (kJ/s)

m = laju aliran massa pada (kg/s)

h = entalpi (kJ/kg)

Perbandingan antara energi dan *exergy* dalam suatu sistem dapat dilihat dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan antara *Energy* dan *Exergy* dalam Suatu Sistem Termal

Energi	<i>Exergy</i>
Hanya bergantung kepada karakteristik aliran energi atau materi, tapi tidak bergantung kepada karakteristik lingkungan	Bergantung kepada karakteristik aliran energi atau materi dan karakteristik lingkungan
Bersifat kekal, tidak dapat bertambah maupun dihilangkan	Bersifat kekal, tidak dapat bertambah maupun dihilangkan pada proses <i>reversible</i> , tetapi bisa berkurang pada proses <i>irreversible</i>
Tampil dalam berbagai bentuk (seperti energi kinetik, potensial, kerja, kalor) dan dapat diukur nilainya dalam bentuk tersebut	Tampil dalam berbagai bentuk (seperti energi kinetik, potensial, kerja, kalor) dan dapat dihitung nilainya dalam bentuk tersebut mengacu kepada kemampuannya untuk menghasilkan kerja
Hanya dapat diukur secara kuantitas	Dapat diukur secara kuantitas dan kualitas

(Sumber: Dincer, 2007)

2.7 Hipotesis

Hipotesis dari penelitian ini adalah dengan adanya tekanan *wellhead* yang semakin besar maka menyebabkan nilai entalpi juga semakin besar dan nilai entropi lebih kecil, maka akan meningkatkan nilai *exergy* pada setiap komponen utama yang terpasang pada PLTP Kamojang Unit 4 dan nilai efisiensi *exergy* pada PLTP akan mencapai maksimum ketika nilai *exergy output* mendekati nilai *exergy input*. Hal ini berarti ketersediaan energi yang ada di dalam sistem digunakan secara maksimal. Sedangkan *exergy losses* terbesar akan terjadi di *cooling tower*.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu Penelitian

Pengambilan data penelitian ini dilaksanakan di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit 4, ditempatkan di *section Maintenance*. Waktu penelitian 9 bulan dengan menggunakan dan mengolah data bulan Mei 2017 yang diperoleh dari *control room* PLTP Kamojang Unit 4.

3.2 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kuantitatif deskriptif dengan pengambilan data operasional di *control room* dan di lapangan. Data yang diperlukan dalam penelitian ini meliputi *mass flow*, tekanan, temperatur pada setiap *state*, temperatur lingkungan, daya pembangkit listrik yang dapat dilihat dalam tabel. Kemudian menghitung nilai entalpi, entropi pada setiap *state* dengan bantuan *software EES (Engineering Equation Solver)*. *Exergy* akan dihitung pada setiap *state*. Setiap *state* dapat dilihat pada Gambar 3.3 jadi *exergy* dihitung mulai dari *state 1* hingga *state 29* menggunakan rumus:

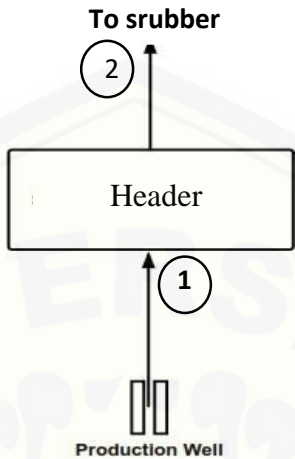
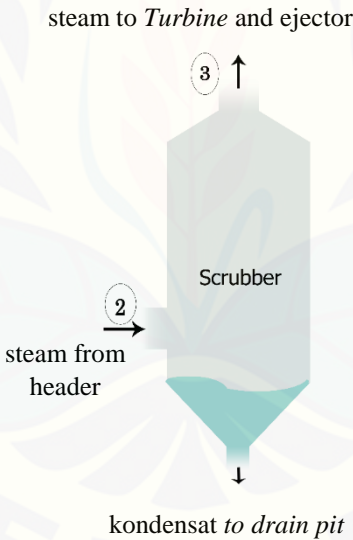
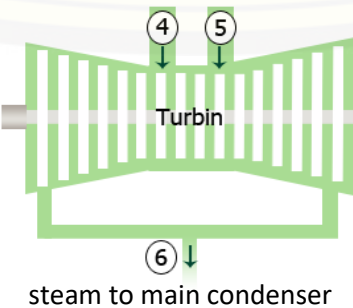
$$E_i = \dot{m}_i \cdot [(h_i - h_0) - T_0 (s_i - s_0)] \dots\dots\dots(27)$$

Dimana:

- \dot{m}_i = laju aliran massa pada *state i* (kg/s)
- S_i = entropi pada *state i* (kJ/kg.K)
- S_0 = entropi pada *state i* (kJ/kg.K)
- h_0 = entalpi lingkungan (kJ/kg)
- h_i = entalpi pada *state i* (kJ/kg)
- T_0 = entalpi lingkungan ($^{\circ}$ C)

Kemudian akan diketahui besarnya *exergy* masuk dan keluar pada masing-masing komponen utama yang terpasang pada PLTP Kamojang Unit 4, sedangkan untuk menghitung *losses exergy*, efisiensi *exergy* dan energi setiap komponen dapat menggunakan rumus seperti Tabel 3.1 dibawah ini:

Tabel 3.1 Rumus *losses*, efisiensi *exergy* dan energi setiap komponen

No	Komponen	Skema	Rumus
1	Header	 <p style="text-align: center;">To scrubber ② ↑ Header ↑ ① Production Well</p>	$E_{\text{loss}} = E_1 - E_2$ $\eta_{\text{header}} = (E_2 / E_1) * 100\%$ $E_n = \dot{m}_1 * (h_1 - h_2)$
2	Scrubber	 <p style="text-align: center;">steam to Turbine and ejector ③ ↑ Scrubber ← ② steam from header ↓ kondensat to drain pit</p>	$E_{\text{loss}} = E_2 - E_3$ $\eta_{\text{scrubber}} = (E_3 / E_2) * 100\%$ $E_n = \dot{m}_2 * (h_2 - h_3)$
3	Turbine	 <p style="text-align: center;">steam from scrubber ④ ⑤ Turbine ↓ ⑥ steam to main condenser</p>	$E_{\text{loss}} = (E_4 + E_5) - (E_6 + W_{\text{thermal}})$ $\eta_{\text{Turbine}} = W_{\text{thermal}} / ((E_4 + E_5) - E_6) * 100\%$ $E_n = (\dot{m}_4 + \dot{m}_5) * (h_4 - h_6)$

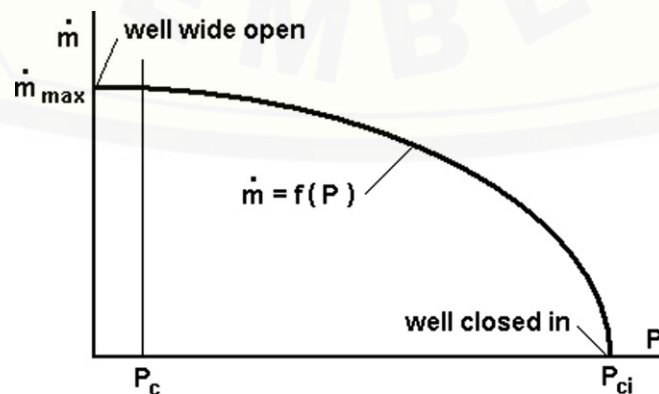
No	Komponen	Skema	Rumus
4	<i>Main Condenser</i>		$E_{\text{loss}} = (E_6 + E_8 + E_9 + E_{10}) - (E_7 + E_{11})$ $\eta_{\text{CND}} = (E_7 + E_{11}) / (E_6 + E_8 + E_9 + E_{10}) * 100\%$ $E_n = (\dot{m}_6 + \dot{m}_8 + \dot{m}_9 + \dot{m}_{10}) * (h_6 + h_8 + h_9 + h_{10} - h_7 - h_{11})$
5	<i>Ejector</i>		$E_{\text{loss}} = (E_{13} + E_{14} + E_{16}) - (E_{17} + E_{18})$ $\eta_{\text{EJC}} = (E_{17} + E_{18}) / (E_{13} + E_{14} + E_{16}) * 100\%$ $E_n = (\dot{m}_{13} + \dot{m}_{14} + \dot{m}_{15} + \dot{m}_{16}) * (h_{13} + h_{14} + h_{15} + h_{16} - h_{17} - h_{18})$
6	<i>Inter-Condenser</i>		$E_{\text{loss}} = (E_{17} + E_{18} + E_{12} + E_{19}) - (E_8 + E_{20})$ $\eta_{\text{ITC}} = (E_8 + E_{20}) / (E_{17} + E_{18} + E_{12} + E_{19}) * 100\%$ $E_n = (\dot{m}_{17} + \dot{m}_{18} + \dot{m}_{19}) * (h_{17} + h_{18} + h_{19} - h_8 - h_{20})$
7	LRVP		$E_{\text{loss}} = (E_{20} + E_{22}) - E_{21}$ $\eta_{\text{LRVP}} = E_{21} / (E_{20} + E_{22}) * 100\%$ $E_n = (\dot{m}_{20} + \dot{m}_{22}) * (h_{20} + h_{22} - h_{21})$

No	Komponen	Skema	Rumus
8	Separator		$E_{loss} = E_{21} - (E_{23} + E_9)$ $\eta_{SEP} = (E_{23} + E_9) / E_{21} * 100\%$ $E_n = \dot{m}_{21} * (h_{21} - h_{23})$
9	Cooling Tower		$E_{loss} = (E_{24} + E_{26} + W_{fan}) - (E_{10} + E_{25})$ $\eta_{CT} = (E_{10} + E_{25}) / (E_{24} + E_{26} + W_{fan}) * 100\%$ $E_n = \dot{m}_{24} * (h_{24} - h_{10})$

Optimasi tekanan *wellhead* akan dilakukan dengan bantuan *software* EES. Menurut DiPippo 2012, produktivitas *dry steam* dalam *wellhead valve* mengikuti persamaan sebagai berikut:

$$\left[\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{max}} \right]^2 + \left[\frac{P}{P_{ci}} \right]^2 = 1 \dots\dots\dots(28)$$

Persamaan tersebut jika digambarkan dalam grafik akan berbentuk seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Grafik *Dry steam productivity curve*

Keterangan Gambar 3.1:

\dot{m} = mass flow condenser

\dot{m}_{\max} = mass flow maksimum

P_c = tekanan condenser

P_{ci} = tekanan kepala sumur maksimum

P = nilai tekanan yang dioptimalkan sesuai dengan tekanan yang diijinkan

PLTP Kamojang Unit 4 memiliki nilai \dot{m}_{\max} sebesar 118.06 kg/s dan nilai P_{ci} sebesar 15 bar. Dengan asumsi bahwa nilai-nilai untuk dua parameter ini tersedia dari uji sumur, maka laju aliran massa uap dapat dihitung dari persamaan:

$$\dot{m} = \dot{m}_{\max} \sqrt{1 - (P/P_{ci})^2} \dots\dots\dots(29)$$

Pada *state Turbine* nilai termodinamika juga dihitung untuk menentukan nilai *net power output* dari sistem. Nilai h_{2S} dan h_2 dapat dihitung dengan rumus:

$$h_{2S} = h_3 + [h_g - h_2] \times \left[\frac{S_1 - S_3}{S_g - S_3} \right] \dots\dots\dots(30)$$

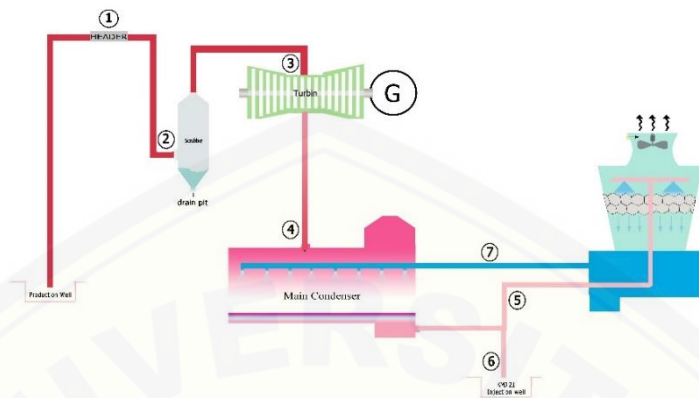
Mengadopsi *Baumann rule*, maka didapatkan nilai h_2 :

$$h_2 = \frac{h_1 - A \times \left[1 - \frac{h_3}{h_g - h_3} \right]}{1 + \frac{A}{h_g - h_3}} \dots\dots\dots(31)$$

Dimana A merupakan:

$$A = 0,425 (h_1 - h_{2S}) \dots\dots\dots(32)$$

Diagram skematik optimasi tekanan *wellhead* pada PLTP Kamojang Unit 4 dapat dilihat pada Gambar 3.2.



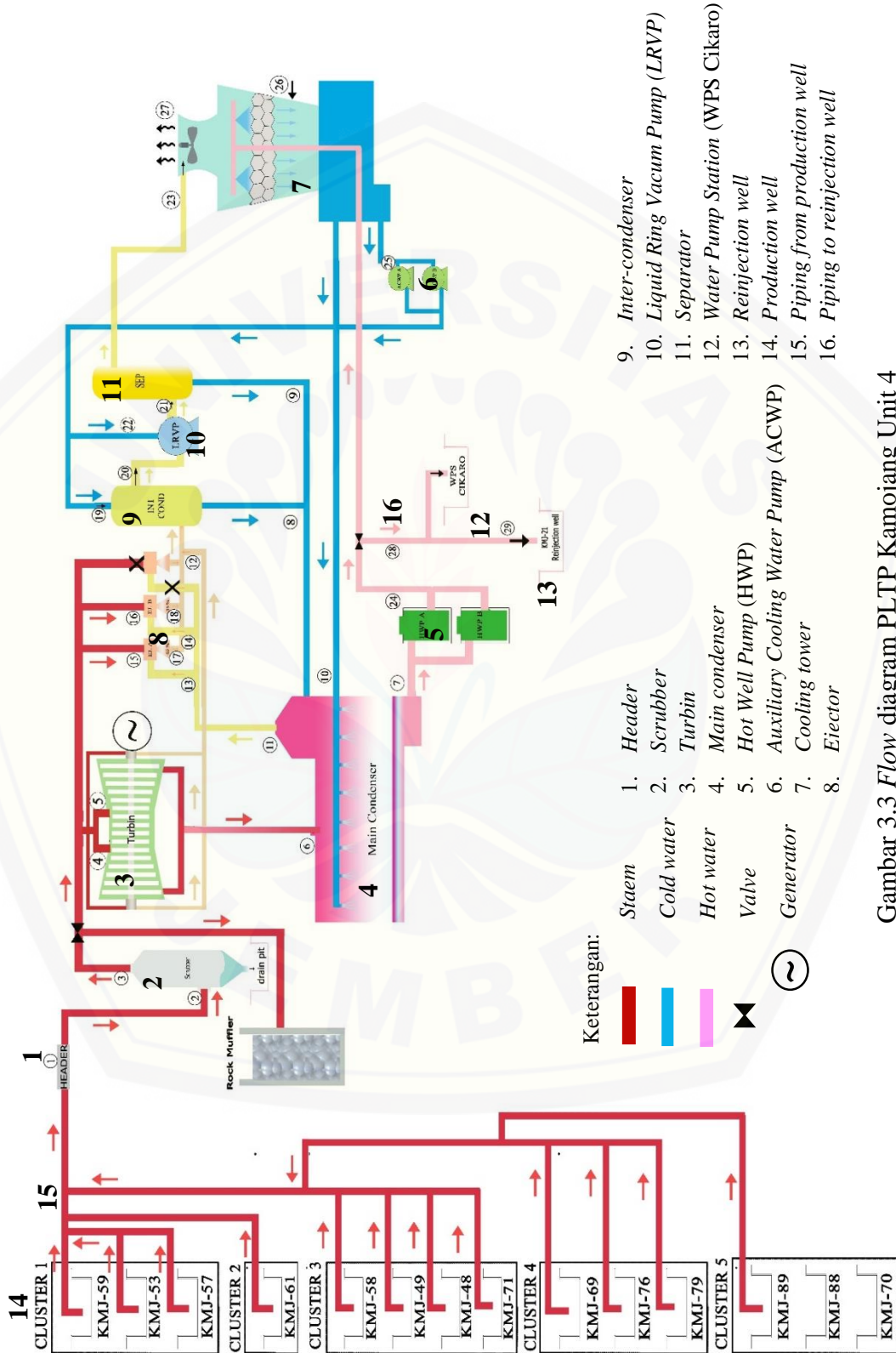
Gambar 3.2 Diagram skematik optimasi tekanan *wellhead*

Keterangan Gambar 3.2:

- 0 = kondisi lingkungan
- 1 = steam yang masuk ke *header*
- 2 = steam yang masuk ke *scrubber*
- 3 = steam yang masuk ke *Turbine*
- 4 = steam yang masuk ke *main condenser*
- 5 = kondensat yang akan didinginkan menggunakan *cooling tower*
- 6 = kondensat yang akan direinjeksikan ke reservoir
- 7 = air pendingin dari *cooling tower* ke *main condenser*

3.3 Flow Diagram PLTP Kamojang Unit 4

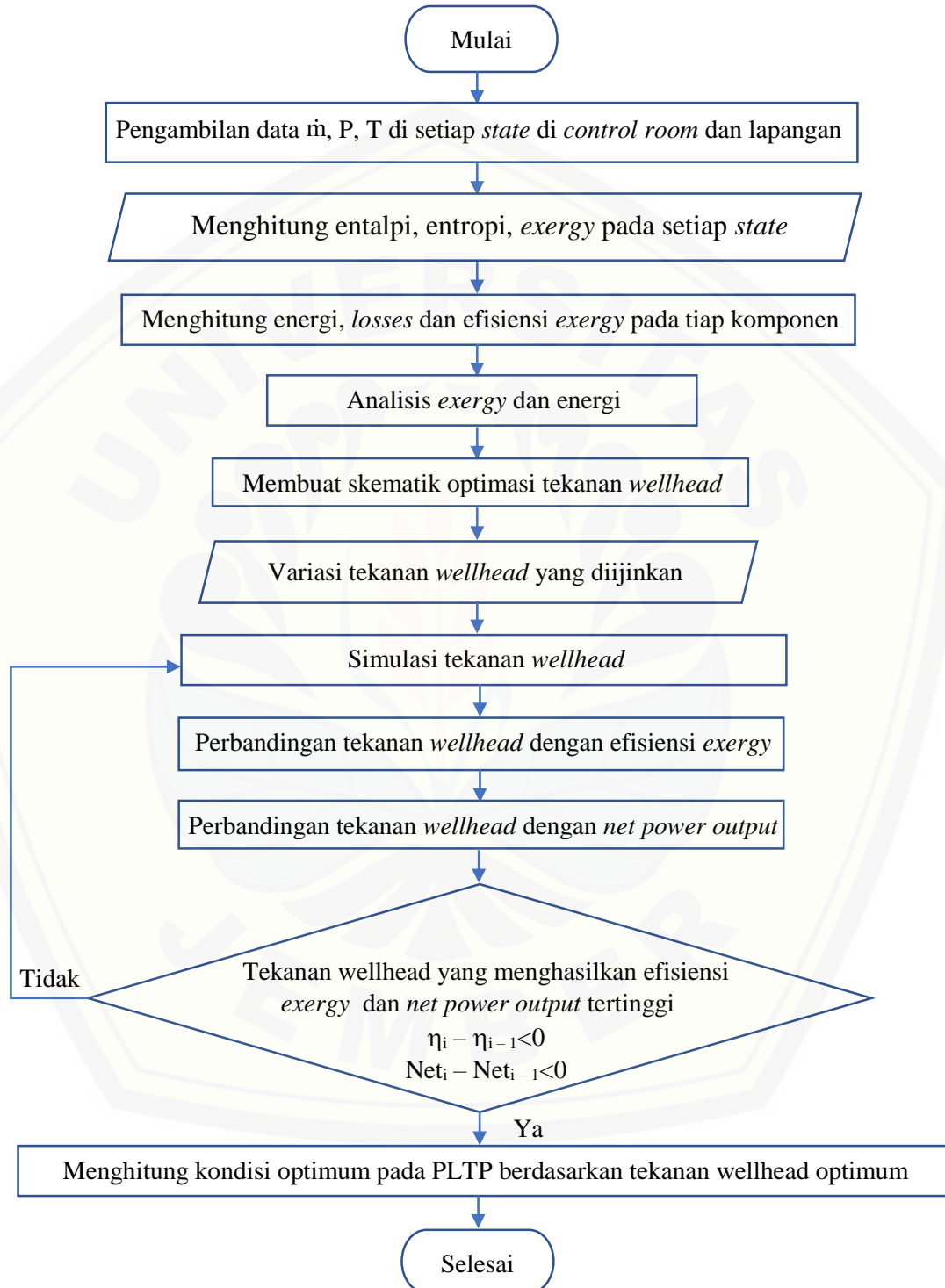
Berikut merupakan *flow* diagram PLTP Kamojang Unit 4



Gambar 3.3 Flow diagram PLTP Kamojang Unit 4

3.4 Flow Chart Penelitian

Flow chart Penelitian yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:



Gambar 3.4 *Flow chart* penelitian

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. Hasil perhitungan *exergy* pada kondisi operasional maka diperoleh data di setiap komponen utama PLTP Kamojang Unit 4 pada Tabel 5.1

Tabel 5.1 Hasil perhitungan *losses exergy* dan *efficiency exergy* setiap komponen

Nama Komponen	<i>Losses Exergy</i> (kJ/s)	<i>Efficiency Exergy</i> (%)
Pipa Uap	34.886,03	89,83
<i>Header</i>	661,64	99,79
<i>Scrubber</i>	20.377,86	93,37
<i>Turbine</i>	24.841,15	65,74
<i>Main Condenser</i>	250.341,80	65,44
<i>Ejector</i>	4.954,49	54,53
<i>Inter-condenser</i>	36.697,15	46,16
LRVP	118,92	94,61
Separator	974,13	81,00
<i>Cooling Tower</i>	371.741,36	59,67
Pipa injeksi	2.663,88	81,09

- b. Kondisi operasional terjadi *losses exergy* terbesar pada *cooling tower* sedangkan *efisiensi exergy* terendahnya pada *inter-condenser*
- c. Pada PLTP Kamojang Unit 4 tekanan yang menghasilkan *net power output* tertinggi berada pada tekanan 13,26 bar dengan *net power output* 59.505 kJ/s
- d. Kondisi tekanan 13,26 bar terjadi *losses exergy* tertinggi pada *main condenser* yaitu sebesar 66.667 kJ/s dan efisiensi terendah juga terdapat pada *main condenser* yaitu 57,83%
- e. Perubahan nilai tekanan *wellhead* dapat merubah efisiensi *exergy* dan *net power output* yang dihasilkan PLTP berjenis *dry steam power plant*. Jika tekanan *wellhead* semakin kecil maka dapat menghasilkan efisiensi *exergy* dan *net power output* semakin besar hingga mencapai titik maksimum.

Setelah melewati titik maksimum, maka efisiensi *exergy* dan *net power output* akan mengalami penurunan

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan disarankan bahwa:

- a. Analisis *exergy* sebaiknya dilaksanakan secara keseluruhan pada komponen PLTP dengan menggunakan data aktual dari komponen instalasi PLTP bukan data *design*
- b. Alat ukur *temperature gauge* dipasang pada *cooling tower stack* karena nantinya dapat diketahui laju aliran massa udara dan dapat diketahui perbandingan laju aliran udara masuk dengan laju aliran udara yang keluar, serta memasang *flow meter* pada *discharge* HWP dengan begitu dapat manajemen distribusi kondensat untuk menjaga temperatur air yang keluar dari cooling tower agar selalu berada dalam kondisi mendekati *welt bulb* udara lingkungan
- c. Alat ukur *temperature gauge*, *pressure gauge*, *flow meter* dipasang pada *inlet ejector* dan *inter-condenser* agar jumlah NCG dapat dimonitoring dan meminimalkan *human error* dalam pengambilan data di lapangan

DAFTAR PUSTAKA

- Aziz, Amiral. 2011. Analisa Eksergi PLTP Kamojang 68 Kapasitas 3 MW, Jakarta: Peneliti Konversi dan Energi dan Team Panas Bumi BPPT.
- Armstead, H, dan Christopher. H. 1983. Geothermal Energy. E. & F. N Spon, London, 404pp.
- Balqis, Eka Rachmania Dimitri., Indriawati. Khaterin, dan L. Bambang. W. 2012. Optimasi Daya Listrik pada PT Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang, Jawa Barat. *Jurnal Teknik Pomits*. 1(1): 1-6.
- Bejan, A., Tsatsaronis. G, Moran. M. 1948. *Thermal Design and Optimization*, John Wiley & Son.
- Cengel, Boles. 2003. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. USA: John Wiley & Sons Ltd.
- Dickson, H., dan M. Fanelli. M. 2004. What is Geothermal Energy?. Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR , Pisa, Italy.
- DiPippo, Ronald. 2012. *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Enviromental*. Elsevier.
- Faradis, Muhammad Nabil Satria. 2016. Study On Analysis of Efficiency Case Study in PT.PGE (Pertamina Geothermal Energy) Kamojang Unit 4, Garut, Jawa Barat. *Tesis*. Yogyakarta: Jurusan Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada.
- Illah, Ibnu Ato. 2016. Analisis Eksergi Sistem Pembangkit Tenaga Panas Bumi Siklus Uap Hasil Pemisahan (Saparated Steam Cycle) di PT Indonesia Power UPJP Kamojang. *Skripsi*. Jember: Jurusan Energi terbarukan Politeknik Negeri Jember.
- Kana, J. D., Djongyang, N. Raidandi, D. Nouck, P. N. Dadge, A. 2014. A Review of Geophysical Metods for Geothermal Exploration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 44: 87-95.
- Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2016. *Indonesia Energy Outlook*. Jakarta: Pusat Data dan Informasi KESDM.
- Kwambai, Clety Bore. 2005. Exergy Analysis of Olkaria I Power Plant. Kenya: Kenya Electricity Generating Company Ltd. Olkaria Geothermal Power Plant, IS-108 Reykjavik, Iceland.

- Masdi, Septian Khairul. 2014. Analisis Exergy, Optimasi Exergoeconomic dengan Metode Multi Objective, dan Optimasi Steam Ejector Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Kamojang Unit 4. *Skripsi*. Depok: Jurusan Teknik Mesin Universitas Indonesia.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N. 2007. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, John Wiley & Sons: New York.
- Pambudi, N., A. R. Itoi, S. Jalilinasrabady, dan K. Jaelani. 2014. Exergy Analysis and Optimization of Dieng Single Flash Geothermal. *Energy Conversion and Management*. 78: 405-411.
- Rudiyanto, Bayu., Illah. Ibnu Atho, Pambudi. N. A, Cheng. Chin-Chi, Adiprana. Reza, Imran. Muhammad, Saw. Lip Huat, dan Handago. Renanto. 2017. Preliminary Analysis of dry-steam Geothermal Power Plant by Employing Exergy Assessment : Case Study in Kamojang Geothermal Power Plant, Indonesia, *Case Studies in Thermal Engineering*. 10: 292-301.
- Santoso, D., dan R. M. Yusuf. 2012. Analisis Eksergi pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi UBP Kamojang Unit PLTP Darajat Jawa Barat. *Prosiding Seminar Nasional Avoer*. Palembang: Universitas Sriwijaya.
- Sekretariat Perusahaan PT PLN (Persero). 2016. *Statistik PLN*. Jakarta: Sekretariat Perusahaan PT PLN (Persero).
- Shukuya, M., dan A. Hammache. 2002. *Introduction to the Concept of Exergy – for Better Understanding of Low-Temperature- Heating and High Temperature-Cooling System*. VTT Tiedotteita.
- Suryadarma, D. 2010. *Sustainable Development of The Kamojang Geothermal Field*. Elsevier.
- Wibowo, N., dan R. Patangke. 2014. *Evaluasi Potensi Silica Scalling pada Pipa Produksi Lapangan Panas Bumi Lahendong-Sulawesi Utara, Proceeding of The 5th Inaga Annual Scientific Conference & Exhibitions*. Yogyakarta.
- Yari, Mortazza. 2010. Exergy Analysis of Various Types of Geothermal Power Plants, *Renewable Energy*. 35: 112-121.

LAMPIRAN

Lampiran 4.1 Formula Perhitungan *Exergy* dengan *Software EES*

```

=====
"ENVIRONMENT"
=====
T[0] = 17 [C]
P[0] = 0,85 [bar]
h[0]=71,36
s[0]=0,25
=====
"WELLHEAD KMJ-59"
=====
P[30] = 13,932 [bar]
T[30] = 194,628 [C]
m[30]= 39253 *Convert (Kg/h;Kg/s)
X[30] = 1
h[30] = Enthalpy(Steam;P=P[30];X=X[30])
s[30]=Entropy(Steam;P=P[30];X=X[30])

E[30] = m[30]*((h[30]-h[0])-(T[0]*(s[30]-s[0])))
=====
"WELLHEAD KMJ-53"
=====
P[31] = 13,808 [bar]
T[31] = 185,653[C]
m[31]= 26252 *Convert (Kg/h;Kg/s)
X[31] = 1
h[31] = Enthalpy(Steam;P=P[31];X=X[31])
s[31]=Entropy(Steam;P=P[31];X=X[31])

E[31] = m[31]*((h[31]-h[0])-(T[0]*(s[31]-s[0])))
=====
"WELLHEAD KMJ-57"
=====
P[32] = 13,772[bar]
T[32] = 174,676[C]
m[32]= 28069 *Convert (Kg/h;Kg/s)
X[32] = 1
h[32] = Enthalpy(Steam;P=P[32];X=X[32])
s[32]=Entropy(Steam;P=P[32];X=X[32])

E[32] = m[32]*((h[32]-h[0])-(T[0]*(s[32]-s[0])))
=====
"WELLHEAD KMJ-61"
=====
P[33] = 13,301[bar]
T[33] = 193,299[C]
m[33]= 73800*Convert (Kg/h;Kg/s)
X[33] = 1
h[33] = Enthalpy(Steam;P=P[33];X=X[33])
s[33]=Entropy(Steam;P=P[33];X=X[33])
E[33] = m[33]*((h[33]-h[0])-(T[0]*(s[33]-s[0])))

```

```

=====
"WELLHEAD KMJ-58"
=====
P[34] = 14,419 [bar]
T[34] = 196,061[C]
m[34]= 22032*Convert (Kg/h;Kg/s)
X[34] = 1
h[34] = Enthalpy(Steam;P=P[34];X=X[34])
s[34]=Entropy(Steam;P=P[34];X=X[34])

E[34] = m[34]*((h[34]-h[0])-(T[0]*(s[34]-s[0])))
=====
"WELLHEAD KMJ-49"
=====
P[35] = 14,377 [bar]
T[35] = 184,524[C]
m[35]= 25450*Convert (Kg/h;Kg/s)
X[35] = 1
h[35] = Enthalpy(Steam;P=P[35];X=X[35])
s[35]=Entropy(Steam;P=P[35];X=X[35])

E[35] = m[35]*((h[35]-h[0])-(T[0]*(s[35]-s[0])))
=====
"WELLHEAD KMJ-48"
=====
P[36] = 14,572 [bar]
T[36] = 196,411[C]
m[36]= 54794*Convert (Kg/h;Kg/s)
X[36] = 1
h[36] = Enthalpy(Steam;P=P[36];X=X[36])
s[36]=Entropy(Steam;P=P[36];X=X[36])

E[36] = m[36]*((h[36]-h[0])-(T[0]*(s[36]-s[0])))
=====
"WELLHEAD KMJ-71"
=====
P[37] = 14,684 [bar]
T[37] = 196,839 [C]
m[37]= 42846*Convert (Kg/h;Kg/s)
X[37] = 1
h[37] = Enthalpy(Steam;P=P[37];X=X[37])
s[37]=Entropy(Steam;P=P[37];X=X[37])

E[37] = m[37]*((h[37]-h[0])-(T[0]*(s[37]-s[0])))
=====
"WELLHEAD KMJ-69"
=====
P[38] = 14,924 [bar]
T[38] = 197,198 [C]
m[38]= 47795*Convert (Kg/h;Kg/s)
X[38] = 1
h[38] = Enthalpy(Steam;P=P[38];X=X[38])
s[38]=Entropy(Steam;P=P[38];X=X[37])

E[38] = m[38]*((h[38]-h[0])-(T[0]*(s[38]-s[0])))

```

```

=====
"WELLHEAD KMJ-76"
=====
P[39] = 15,041[bar]
T[39] = 197,5[C]
m[39]= 43137 *Convert (Kg/h;Kg/s)
X[39] = 1
h[39] = Enthalpy(Steam;P=P[39];X=X[39])
s[39]=Entropy(Steam;P=P[39];X=X[39])

E[39] = m[39]*((h[39]-h[0])-(T[0]*(s[39]-s[0])))
=====
"WELLHEAD KMJ-75"
=====
P[40] = 14,874 [bar]
T[40] = 197,29 [C]
m[40]= 31596*Convert (Kg/h;Kg/s)
X[40] = 1
h[40] = Enthalpy(Steam;P=P[40];X=X[40])
s[40]=Entropy(Steam;P=P[40];X=X[40])

E[40] = m[40]*((h[40]-h[0])-(T[0]*(s[40]-s[0])))
=====
"WELLHEAD KMJ-89"
=====
P[41] = 18,544 [bar]
T[41] = 196,07 [C]
m[41] = 37470*Convert (Kg/h;Kg/s)
X[41] = 1
h[41] = Enthalpy(Steam;P=P[41];X=X[41])
s[41]=Entropy(Steam;P=P[41];X=X[41])

E[41]=m[41]*((h[41]-h[0])-(T[0]*(s[41]-s[0])))
=====
"HEADER"
=====
//From Well
P[1] = 13,069[bar]
T[1] = 196,29 [C]
m[1] = 425100*Convert (kg/h;kg/s)
X[1] = 1
h[1] = Enthalpy(Steam;P=P[1];X=X[1])
s[1]=Entropy(Steam;P=P[1];X=X[1])

E[1] = m[1]*((h[1]-h[0])-(T[0]*(s[1]-s[0])))
En[1] = m[1]*(h[1]-h[2])
Ein [1] =E[1]
Eout [1] =E[2]
E_loss [1]= E[1]- E[2]
eta[1] = (E[2]/E[1])*100
=====
"SCRUBBER"
=====
//Inlet Scrubber
P[2] = 11,370 [bar]

```

```
T[2] = 190,29 [C]
m[2] =425100*Convert (kg/h;kg/s)
X[2] = 1
h[2] = Enthalpy(Steam;P=P[2];X=X[2])
s[2]=Entropy(Steam;P=P[2];X=X[2])
```

```
//Outlet Scrubber
```

```
P[3] = 11,037[ bar]
T[3] = 183,814 [C]
m[3] =397119*Convert (kg/h;kg/s)
X[3] = 1
h[3] = Enthalpy(Steam;P=P[3];X=X[3])
s[3]=Entropy(Steam;P=P[3];X=X[3])
```

```
E[2] = m[2]*((h[2]-h[0])-(T[0]*(s[2]-s[0])))
E[3] = m[3]*((h[3]-h[0])-(T[0]*(s[3]-s[0])))
```

```
En[2] = m[2]*(h[2]-h[3])
Ein [2] =E[2]
Eout [2] =E[3]
E_loss [2]= E[2]- E[3]
eta[2] = (E[3]/E[2])*100
```

```
"=====
"                                "TURBINE"
"=====
```

```
//Right inlet Turbine
```

```
P[4] = 9,9935 [bar]
T[4] = 183,814 [C]
m[4] = 198559,5*Convert (kg/h;kg/s)
X[4] = 1
h[4] = Enthalpy(Steam;P=P[4];X=X[4])
s[4]=Entropy(Steam;P=P[4];X=X[4])
```

```
//Left inlet Turbine
```

```
P[5] = 9,9942 [bar]
T[5] = 183,441 [C]
m[5] = 198559,5*Convert (kg/h;kg/s)
X[5] = 1
h[5] = Enthalpy(Steam;P=P[5];X=X[5])
s[5]=Entropy(Steam;P=P[5];X=X[5])
Wthermal= 47657,337 [kJ/s]
```

```
E[4] = m[4]*((h[4]-h[0])-(T[0]*(s[4]-s[0])))
E[5] = m[5]*((h[5]-h[0])-(T[0]*(s[5]-s[0])))
```

```
En[4] = (m[4]+m[5])*(h[4]-h[6])
Ein [4] =(E[4]+E[5])
Eout [4] =(E[6]+Wthermal)
E_loss [4]= (E[4]+E[5])-(E[6]+Wthermal)
eta[4] =Wthermal/((E[4]+E[5])-E[6])*100
```

```
"=====
"                                "MAIN CONDENSOR"
"=====
```

```
//From Turbine
```

```
P[6] = 0,139 [bar]
```

T[6] = 53,620 [C]
 m[6] = 397119*Convert (kg/h;kg/s)
 X[6] = 0,8

//From Main Condenser to CT

P[7] = 0,284 [bar]
 T[7] = 50 [C]
 m[7] = 8384034*Convert(kg/h;kg/s)
 X[7] = 0

//From Int-Cond to Main Condenser

P[8] = 0,26 [bar]
 T[8] = 47,771 [C]
 m[8] = 576463*Convert(kg/h;kg/s)
 X[8] = 0

//From Separator to Main Condenser

P[9] = 0,9 [bar]
 T[9] = 41,694[C]
 m[9] = 15927*Convert(kg/h;kg/s)
 X[9] = 0

//From CT to Main Condenser

P[10] = 0,4 [bar]
 T[10] = 26,64[C]
 m[10] = 7381203*Convert(kg/h;kg/s)
 X[10] = 0

//From Main Condenser to Ejector

P[11] = 0,111 [bar]
 T[11] = 42,941 [C]
 m[11] = 8495*Convert(kg/h;kg/s)
 X[11] = 1

h[6] = Enthalpy(Steam;P=P[6];X=X[6])
 h[7] = Enthalpy(Water;P=P[7];X=X[7])
 h[8] = Enthalpy(Water;P=P[8];X=X[8])
 h[9] = Enthalpy(Water;P=P[9];X=X[9])
 h[10] = Enthalpy(Water;P=P[10];X=X[10])
 h[11] = Enthalpy(Steam;T=T[11];X=X[11])
 s[6] = Entropy(Steam;P=P[6];X=X[6])
 s[7] = Entropy(Water;P=P[7];X=X[7])
 s[8] = Entropy(Water;P=P[8];X=X[8])
 s[9] = Entropy(Water;P=P[9];X=X[9])
 s[10] = Entropy(Water;P=P[10];X=X[10])
 s[11] = Entropy(Steam;P=P[11];X=X[11])

E[6] = m[6]*((h[6]-h[0])-(T[0]*(s[6]-s[0])))
 E[7] = m[7]*((h[7]-h[0])-(T[0]*(s[7]-s[0])))
 E[8] = m[8]*((h[8]-h[0])-(T[0]*(s[8]-s[0])))
 E[9] = m[9]*((h[9]-h[0])-(T[0]*(s[9]-s[0])))
 E[10] = m[10]*((h[10]-h[0])-(T[0]*(s[10]-s[0])))
 E[11] = m[11]*((h[11]-h[0])-(T[0]*(s[11]-s[0])))

En [6] =(m[6]+m[8]+m[10] +m[9])*(h[6]+h[8]+h[9]+h[10]-h[7]-h[11])


```

Ein [6] =E[6]+E[8]+E[10] +E[9]
Eout [6] =(E[7]+E[11])
E_loss [6]= (E[6]+E[8]+E[10] +E[9])-(E[7]+E[11])
eta[6] = (E[7]+E[11])/(E[6]+E[8]+E[10] +E[9])*100
"=====
"
"EJECTOR"
"=====
//Gland steam from casing drain Turbine
P[12]=0,5 [bar]
T[12]=149,7[C]
m[12]=130*Convert(kg/h;kg/s)
X[12] =1
h[12] = Enthalpy(Steam;P=P[12];X=X[12])
s[12]=Entropy(Steam;P=P[12];X=X[12])

//NCG from Main Condenser to Ejector 65%
P[13]=P[11]
T[13]=T[11]
m[13]=m[11]*65/100
X[13] =1
h[13] = Enthalpy(Steam;P=P[13];X=X[13])
s[13]=Entropy(Steam;P=P[13];X=X[13])

//NCG from Main Condenser to Ejector 35%
P[14]=P[11]
T[14]=T[11]
m[14]=m[11]*35/100
X[14] =1
h[14] = Enthalpy(Steam;P=P[14];X=X[14])
s[14]=Entropy(Steam;P=P[14];X=X[14])

//Motive steam to Ejector 65%
P[15]=10,917[bar]
T[15]=181,1[C]
m[15]=4743*Convert (kg/h;kg/s)
X[15] =1
h[15] = Enthalpy(Steam;P=P[15];X=X[15])
s[15]=Entropy(Steam;P=P[15];X=X[15])

//Motive steam to Ejector 35%
P[16]=10,963[bar]
T[16]=181,1[C]
m[16]=2554*Convert (kg/h;kg/s)
X[16] =1
h[16] = Enthalpy(Steam;P=P[16];X=X[16])
s[16]=Entropy(Steam;P=P[16];X=X[16])
//From Ejector 65% to Inter Condenser
P[17]= 2 [bar]
T[17]=75[C]
m[17]=m[13]
X[17] =1
h[17] = Enthalpy(Steam;P=P[17];X=X[17])
s[17]=Entropy(Steam;P=P[17];X=X[17])

```

//From Ejector 35% to Inter Condenser

P[18]=P[17]
 T[18]=T[17]
 m[18]=m[14]
 X[18]=1
 h[18] = Enthalpy(Steam;P=P[18];X=X[18])
 s[18]=Entropy(Steam;P=P[18];X=X[18])

E[12] = m[12]*((h[12]-h[0])-(T[0]*(s[12]-s[0])))
 E[13] = m[13]*((h[13]-h[0])-(T[0]*(s[13]-s[0])))
 E[14] = m[14]*((h[14]-h[0])-(T[0]*(s[14]-s[0])))
 E[15] = m[15]*((h[15]-h[0])-(T[0]*(s[15]-s[0])))
 E[16] = m[16]*((h[16]-h[0])-(T[0]*(s[16]-s[0])))
 E[17] = m[17]*((h[17]-h[0])-(T[0]*(s[17]-s[0])))
 E[18] = m[18]*((h[18]-h[0])-(T[0]*(s[18]-s[0])))

En [13]=(m[13]+m[14] +m[15]+m[16])*(h[13]+h[14] +h[15]+h[16]-h[17]-h[18])
 Ein [13] =(E[13]+E[14] +E[15]+E[16])
 Eout [13] =(E[17]+E[18])
 E_loss [13]= (E[13]+E[14] +E[15]+E[16])-(E[17]+E[18])
 eta[13] = (E[17]+E[18])/(E[13]+E[14] +E[15]+E[16])*100

"=====
 "INTER CONDENSER"
 "=====

//Condensate from CT to Inter Condenser

P[19]=1,757[bar]
 T[19]=26,64[C]
 m[19]=565999 *Convert (kg/h;kg/s)
 X[19] =0
 h[19] = Enthalpy(Water;P=P[19];X=X[19])
 s[19]=Entropy(Water;P=P[19];X=X[19])

//Condensate and NCG from Inter Condenser to LRVP

P[20] = 0,544 [bar]
 T[20] = 49,123 [C]
 m[20] = 7285 *Convert (kg/h;kg/s)
 X[20] = 0
 h[20] = Enthalpy(Water;P=P[20];X=X[20])
 s[20]=Entropy(Water;P=P[20];X=X[20])

E[19] = m[19]*((h[19]-h[0])-(T[0]*(s[19]-s[0])))
 E[20] = m[20]*((h[20]-h[0])-(T[0]*(s[20]-s[0])))

En [19] =(m[17]+m[18]+m[19])*(h[17]+h[18]+h[19]-h[20]-h[8])
 Ein [19] =(E[17]+E[18]+E[12] +E[19])
 Eout [19] =(E[20]+E[8])
 E_loss [19]= (E[17]+E[18]+E[12] +E[19])-(E[20]+E[8])
 eta[19] = (E[20]+E[8])/(E[17]+E[18] +E[19]+E[12])*100

"=====
 "LIQUID RING VACUUM PUMP"
 "=====

//Condensate from LRVP to Separator

P[21] = 0,9 [bar]
 T[21] = 33,31 [C]
 m[21] = 6,589 [kg/s]

X[21] = 0
 h[21] = Enthalpy(Water;P=P[21];X=X[21])
 s[21]=Entropy(Water;P=P[21];X=X[21])

//Condensate from Cooling Tower to LRVP

P[22] = 1,55 [bar]
 T[22] = 26,64 [C]
 m[22] = 15848*Convert (kg/h;kg/s)
 X[22] = 0
 h[22] = Enthalpy(Water;P=P[22];X=X[22])
 s[22]=Entropy(Water;P=P[22];X=X[22])

E[21] = m[21]*((h[21]-h[0])-(T[0]*(s[21]-s[0])))
 E[22] = m[22]*((h[22]-h[0])-(T[0]*(s[22]-s[0])))

En [21]=(m[20]+m[22])*(h[20]+h[22]-h[21])
 Ein [21]=(E[20]+E[22])
 Eout[21]= E[21]
 E_loss[21]=(E[20]+E[22])-E[21]
 eta[21]=E[21]/(E[20]+E[22])*100

"===== "
 "SEPARATOR"

//NCG from Separator to stack CT

P[23] = 0,9[bar]
 T[23] = 34,2[C]
 m[23] =7285 *Convert (kg/h;kg/s)
 h[23] = Enthalpy(Air;T=T[23])
 s[23]=Entropy(Air;T=T[23];P=P[23])

E[23] = m[23]*((h[23]-h[0])-(T[0]*(s[23]-s[0])))

En [23]=m[21]*(h[21]-h[23])
 Ein [23]=E[21]
 Eout [23]=(E[23]+E[9])
 E_loss[23]=(E[23]+E[21])-E[9]
 eta[23]=(E[23]+E[9])/E[21]*100

"===== "
 "COOLING TOWER"

//Condensate from HWP

P[24]= 2,121[bar]
 T[24] = 49,419[C]
 m[24] =7381203*Convert(kg/h;kg/s)
 X[24] =0
 h[24] = Enthalpy(Water;P=P[24];X=X[24])
 s[24]=Entropy(Water;P=P[24];X=X[24])

//Condensate from CT to ACWP

P[25] =0,9 [bar]
 T[25] = 26,64 [C]
 m[25] = 819442*Convert (kg/h;kg/s)
 X[25] =0
 h[25] = Enthalpy(Water;P=P[25];X=X[25])
 s[25]=Entropy(Water;P=P[25];X=X[25])

//Air to inside CT

P[26]=0,85 [bar]
 T[26] = 20,80 [C]
 m[26] =172000 *Convert (kg/h;kg/s)
 h[26] = Enthalpy(Air;T=T[26])
 s[26]=Entropy(Air;T=T[26];P=P[26])

//NCG to stack CT

P[27]=P[23]
 T[27] = T[23]
 m[27] = m[23]
 X[27] = 1
 h[27] = Enthalpy(Steam;P=P[27];X=X[27])
 s[27]=Entropy(Steam;P=P[27];X=X[27])
 W_fan=4*186 [kJ/s]

E[24] = m[24]*((h[24]-h[0])-(T[0]*(s[24]-s[0])))
 E[25] = m[25]*((h[25]-h[0])-(T[0]*(s[25]-s[0])))
 E[26]= m[26]*((h[26]-h[0])-(T[0]*(s[26]-s[0])))
 E[27] = m[27]*((h[27]-h[0])-(T[0]*(s[27]-s[0])))

En [24]=m[24]*(h[24]+h[26]-h[10]-h[25])
 Ein [24]=(E[24]+E[26])
 Eout [24]=(E[10]+E[25])
 E_loss [24]= (E[24]+E[26])-(E[10]+E[25])
 eta[24] =(E[10]+E[25])/(E[24]+E[26])*100

"=====
 "PIPING RE-INJECTION WELL"
 "=====

//To well injection

P[28]=1[bar]
 T[28]= 49 [C]
 X[28] = 0
 m[28] = 125298*Convert (kg/h;kg/s)
 h[28] = Enthalpy(Water;P=P[28];X=X[28])
 s[28]=Entropy(Water;P=P[28];X=X[28])

//Discharge from HWP

P[29]=2,121 [bar]
 T[29]= 49,42 [C]
 X[29] = 0
 m[29]=120969*Convert (kg/h;kg/s)
 h[29] = Enthalpy(Water;P=P[29];X=X[29])
 s[29]=Entropy(Water;P=P[29];X=X[29])

E[28] = m[28]*((h[28]-h[0])-(T[0]*(s[28]-s[0])))
 E[29] = m[29]*((h[29]-h[0])-(T[0]*(s[29]-s[0])))

En [28]=m[29] *(h[29] - h[28])
 Ein [28]=E[28]
 Eout [28]=E[29]
 E_loss[28]= E[29] - E[28]
 eta[28]=E[28]/E[29]*100

Lampiran 4.2 Hasil Perhitungan Energi dengan Software EES

Suit	η_i [%]	P_i [bar]	T_i [C]	m_i [kg/s]	h_i [(kJ/kg)]	s_i [(kJ/l)]	X_i	E_i [kJ/s]	$E_{loss,i}$ [kJ/s]	$E_{in,i}$ [kJ/s]	$E_{out,i}$ [kJ/s]	$E_{n,i}$ [kJ/s]
[0]		0,85	17,00		71,36	0,25						
[1]	99,79	13,07	196,29	118,08	2787,21	6,49	1	308165,44	661,64	308165,44	307503,79	563,72
[2]	93,37	11,37	190,29	118,08	2782,44	6,54	1	307503,79	20377,86	307503,79	287125,93	126,21
[3]		11,04	183,81	110,31	2781,37	6,55	1	287125,93				
[4]	65,74	9,99	183,81	55,16	2777,69	6,59	1	143327,50	24841,15	286655,17	261814,01	72522,17
[5]		9,99	103,44	55,16	2777,69	6,59	1	143327,67				
[6]	65,44	0,14	53,62	110,31	2120,25	6,57	0,8	214156,68	250341,80	724388,47	474046,66	595466,34
[7]		0,28	50,00	2328,90	284,04	0,93	0	468445,59				
[8]		0,26	47,77	160,13	275,67	0,90	0	30935,77				
[9]		0,90	41,69	4,42	405,20	1,27	0	1400,28				
[10]		0,40	26,64	2050,33	317,64	1,03	0	477895,74				
[11]		0,11	42,94	2,36	2578,62	8,11	1	5601,08				
[12]		0,50	149,70	0,04	2587,42	8,11	1	86,03				
[13]	54,53	0,11	42,94	1,53	2587,42	8,11	1	3654,19	4954,49	10896,91	5942,42	23353,94
[14]		0,11	42,94	0,83	2587,42	8,11	1	1967,64				
[15]		10,92	181,10	1,32	2780,97	6,56	1	3428,69				
[16]		10,96	181,10	0,71	2781,13	6,55	1	1846,40				
[17]		2,00	75,00	1,53	2706,54	7,13	1	3862,57				
[18]		2,00	75,00	0,83	2706,54	7,13	1	2079,85				
[19]	46,16	1,76	26,64	157,22	487,60	1,49	0	62137,37	36697,15	68165,82	31468,67	841887,46
[20]		0,54	49,12	2,02	349,43	1,12	0	532,90				
[21]	94,61	0,90	33,31	6,59	405,20	1,27	0	2085,47	118,92	2204,39	2085,47	2670,49
[22]		1,55	26,64	4,40	471,36	1,44	0	1671,49				
[23]	81	0,90	34,20	2,02	307,82	5,76		288,94	974,13	2085,47	1689,23	641,67
[24]	59,67	2,12	49,42	2050,33	512,75	1,55	0	859663,03	371741,36	921681,40	549940,04	172770,06
[25]		0,90	26,64	227,62	405,20	1,27	0	72044,30				
[26]		0,85	20,80	477,78	294,35	5,73		62018,37				
[27]		0,90	34,20	2,02	2670,49	7,39	1	5013,86				
[28]	81,09	1,00	49,00	34,81	417,51	1,30	0	11424,96	2663,88	11424,96	14088,84	3200,13
[29]		2,12	49,42	33,60	512,75	1,55	0	14088,84				
[30]		13,93	194,63	10,90	2789,26	6,47	1	28482,00				
[31]		13,81	185,65	7,29	2788,98	6,47	1	19046,03				
[32]		13,77	174,68	7,80	2788,90	6,47	1	20363,51				
[33]		13,30	193,30	20,50	2787,79	6,49	1	53513,35				
[34]		14,42	196,06	6,12	2790,32	6,46	1	15994,19				
[35]		14,38	184,52	7,07	2790,23	6,46	1	18474,75				
[36]		14,57	196,41	15,22	2790,64	6,45	1	39783,70				
[37]		14,68	196,84	11,90	2790,87	6,45	1	31112,03				
[38]		14,92	197,20	13,28	2791,36	6,45	1	34713,39				
[39]		15,04	197,50	11,98	2791,59	6,44	1	31333,61				
[40]		14,87	197,29	8,78	2791,26	6,45	1	22947,04				
[41]		18,54	196,07	10,41	2797,09	6,37	1	27287,86				
[42]	89,83			131,25				343051,47	34886,03			

Lampiran 4.3 Optimasi Tekanan *Wellhead* dengan Software EES

```

=====
"ENVIRONMENT"
=====
T[0] = 17 [C]
P[0] = 0,85 [bar]
h[0]=Enthalpy(Air;T=T[0])
s[0]=Entropy(Air;T=T[0];P=P[0])

//From Well
Pci=15,4
{P[1]= 13.07[bar]}
T[1] = 196,29 [C]
m_max =118,06[kg/s]
m = m_max*(1-((P[1]/Pci)^2))^(1/2)
X[1] = 1
h[1] = 2787
s[1]=Entropy(Steam;P=P[1];X=X[1])

E[1] = m*((h[1]-h[0])-(T[0]*(s[1]-s[0])))

E_loss [1]= E[1]- E[2]
eta[1] = (E[2]/E[1])*100

deltah = h[1]- h[2]
=====
"SCRUBBER"
=====
//Inlet Scrubber
P[2] = 11,370 [bar]
T[2] = 190,29 [C]
m[2] = 107,1[kg/s]
X[2] = 1
s[2]=Entropy(Steam;P=P[2];X=X[2])

h[9]= 2375,6
s[9]=7,3876

h[21]=h[4]+(h[9]-h[4])*((s[1]-s[4])/(s[9]-s[4]))
A=0,425*(h[1]-h[21])
h[2]=(h[1]-A*(1-(h[4]/(h[9]-h[4]))))/(1+(A/(h[9]-h[4])))
E[2] = m[2]*((h[2]-h[0])-(T[0]*(s[2]-s[0])))
E_loss [2]= E[2]- E[3]
=====
"TURBINE"
=====
// inlet Turbine
P[3] = 11 [bar]
T[3] = 183,441 [C]
m[3] =m*(1-((P[1]/Pci)^2))^(1/2)
X[3] = 1
h[3] = Enthalpy(Steam;P=P[3];X=X[3])
s[3]=Entropy(Steam;P=P[3];X=X[3])

E[3] = m[3]*((h[3]-h[0])-(T[0]*(s[3]-s[0])))

```

```

=====
"MAIN CONDENSOR"
=====
//From Turbine
P[4] = 0,139 [bar]
T[4] = 53,620 [C]
m[4] =m
X[4] = 0,8

//From Main Condenser to CT
P[5] = 0,284 [bar]
T[5] = 50 [C]
m[5] = m
X[5] = 0
E_loss [5]= E[5]-E[7]

//To well injection
P[6]=1[bar]
T[6]= 49 [C]
X[6] = 0
m[6] = 15927*Convert(kg/h;kg/s)

//From CT to Main Condenser
P[7] = 0,4 [bar]
T[7] = 26,203[C]
m[7] =7381203*Convert(kg/h;kg/s)
X[7] = 0

h[4] = Enthalpy(Steam;P=P[4];X=X[4])
h[5] = Enthalpy(Water;P=P[5];X=X[5])
h[6] = Enthalpy(Water;P=P[6];X=X[6])
h[7] = Enthalpy(Water;P=P[7];X=X[7])
s[4] = Entropy(Steam;P=P[4];X=X[4])
s[5] = Entropy(Water;P=P[5];X=X[5])
s[6] = Entropy(Water;P=P[6];X=X[6])
s[7] = Entropy(Water;P=P[7];X=X[7])

E[4] = m[4]*((h[4]-h[0])-(T[0]*(s[4]-s[0])))
E[5] = m[5]*((h[5]-h[0])-(T[0]*(s[5]-s[0])))
E[6] = m[6]*((h[6]-h[0])-(T[0]*(s[6]-s[0])))
E[7] = m[7]*((h[7]-h[0])-(T[0]*(s[7]-s[0])))

P=P[1]/Pci

E_max=247846

Ethtvalve=E_max-E[1]
Et=E[3]-E[4]
Ec=E[4]-E[6]

E_loss=Ethtvalve+Et+Ec
Net_ideal=E_max-E_loss
Net_Power=Net_ideal*0,8
Efisiensi_Exergy=(Net_ideal/E_max)*100

```

1.20	1 P ₁ [bar]	2 Efisiensi _{Exergy}	3 Net _{power}
Run 1	12	28,14	55804
Run 2	12,16	28,51	56530
Run 3	12,32	28,85	57199
Run 4	12,47	29,15	57802
Run 5	12,63	29,42	58332
Run 6	12,79	29,65	58780
Run 7	12,9	29,78	59037
Run 8	13,11	29,95	59380
Run 9	13,26	30,01	59505
Run 10	13,42	30,00	59491
Run 11	13,5	29,97	59425
Run 12	13,74	29,73	58955
Run 13	13,89	29,44	58375
Run 14	14,05	29,02	57535
Run 15	14,21	28,44	56382
Run 16	14,37	27,66	54845
Run 17	14,53	26,64	52824
Run 18	14,68	25,30	50172
Run 19	14,84	23,53	46652
Run 20	15	21,11	41849