

**ANALISIS PENGARUH LAJU MASSA UAP TERHADAP
EFISIENSI KINERJA TURBIN UAP PADA PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA PANAS BUMI ULUBELU**

(Skripsi)

Oleh

Dea Fitrianingsih

2117041083



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

ANALISIS PENGARUH LAJU MASSA UAP TERHADAP EFISIENSI KINERJA TURBIN UAP PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI ULUBELU

Oleh

DEA FITRIANINGSIH

Telah dilakukan penelitian untuk menganalisis laju massa uap, tekanan, temperatur, laju uap masuk, fraksi uap, entalpi, daya turbin, kerja aktual turbin, daya *input* dan *output* turbin, serta efisiensi turbin. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh laju massa uap terhadap efisiensi turbin, menentukan hubungan antara laju massa uap dan efisiensi turbin, dan memberikan rekomendasi terkait pengoperasian turbin uap yang optimal dalam hal laju massa uap untuk meningkatkan efisiensi turbin. Hasil perhitungan laju aliran massa uap berkisar antara 80,0 kg/s hingga 86,9 kg/s. Nilai fraksi kekeringan (x) berkisar antara 83,01% hingga 83,74%, yang menunjukkan kualitas uap masih dalam rentang efisien untuk menghindari kerusakan turbin akibat uap basah. Entalpi masuk ke turbin (h_1) stabil di kisaran 2755–2758 kJ/kg, sedangkan entalpi keluar (h_{2s}) menunjukkan nilai antara 2180–2216 kJ/kg, yang berpengaruh langsung terhadap kerja turbin (W), dihitung sebagai selisih antara h_1 dan h_2 dengan dikalikan laju aliran massa. Nilai efisiensi turbin berada pada kisaran 93,13% hingga 94,17%, dengan rata-rata sebesar 93,32%, yang termasuk tinggi untuk sistem pembangkit uap. Selisih nilai antara kerja aktual dan kerja *isentropis* kecil, sehingga diperoleh efisiensi turbin yang mendekati 100%, yang berarti sistem turbin mendekati desain atau proses ideal.

Kata kunci : Efisiensi turbin, laju massa uap.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE EFFECT OF STEAM MASS RATE ON STEAM TURBINE PERFORMANCE EFFICIENCY IN ULUBELU GEOTHERMAL POWER PLANT

By

DEA FITRIANINGSIH

A study has been conducted to analyze the steam mass rate, pressure, temperature, steam inlet rate, steam fraction, enthalpy, turbine power, actual turbine work, turbine input and output power, and turbine efficiency. This study aims to analyze the effect of steam mass rate on turbine efficiency, determine the relationship between steam mass rate and turbine efficiency, and provide recommendations regarding optimal steam turbine operation in terms of steam mass rate to increase turbine efficiency. The results of the steam mass flow rate calculation range from 80.0 kg/s to 86.9 kg/s. The dryness fraction value (x) ranges from 83.01% to 83.74%, which indicates that the steam quality is still in the efficient range to avoid turbine damage due to wet steam. The turbine inlet enthalpy (h_1) is stable in the range of 2755–2758 kJ/kg, while the outlet enthalpy (h_2) shows a value between 2180–2216 kJ/kg, which directly affects the turbine work (W), calculated as the difference between h_1 and h_2 multiplied by the mass flow rate. The turbine efficiency value is in the range of 93.13% to 94.17%, with an average of 93.32%, which is high for a steam generator system. The difference in value between actual work and isentropic work is small, so that the turbine efficiency is close to 100%, which means that the turbine system is close to the ideal design or process.

Keywords: *Efficiency, steam mass rate.*

**ANALISIS PENGARUH LAJU MASSA UAP TERHADAP
EFISIENSI KINERJA TURBIN UAP PADA PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA PANAS BUMI ULUBELU**

Oleh

Dea Fitrianingsih

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA SAINS

Pada

Jurusan Fisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Lampung



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Laju Massa Uap Terhadap Efisiensi Kinerja Turbin Uap Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Ulubelu

Nama Mahasiswa : Dea Fitriyaningsih

Nomor Pokok Mahasiswa : 2117041083

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Drs. Pulung Karo Karo, M.Si.
NIP. 196107231986031003

Drs. Amir Supriyanto, M.Si.
NIP. 196504071991111001

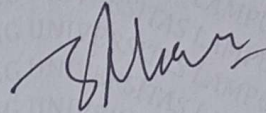
2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

Arif Surtano, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP. 197109092000121001

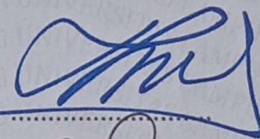
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

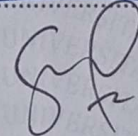
Ketua : **Drs. Pulung Karo Karo, M.Si.**



Sekretaris : **Drs. Amir Supriyanto, M.Si.**



Penguji : **Dr. Yanti Yuliyanti, S.Si., M.Si.**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **23 Juni 2025**

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : **Dea Fitrianingsih**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2117041083**

Jurusan : **Fisika**

Judul Skripsi : **ANALISIS PENGARUH LAJU MASSA UAP
TERHADAP EFISIENSI KINERJA TURBIN
UAP PADA PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA PANAS BUMI ULUBELU**

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri, bukan hasil orang lain dan semua hasil tulisan yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti kaidah penulisan karya ilmiah Universitas Lampung. Apabila kemudian hari terbukti bahwa skripsi ini merupakan hasil salinan atau dibuat oleh orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan akademik yang berlaku.

Bandar Lampung, 23 Juni 2025



Dea Fitrianingsih
NPM. 2117041083

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Dea Fitrianingsih, dilahirkan di Bandung pada tanggal 06 Desember 2002. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan Bapak Marjono dan Ibu Homsiyah.

Penulis menyelesaikan pendidikan di Sekolah Dasar Negeri (SDN) 1 Wonoharjo pada tahun 2009-2015, dilanjutkan ke Sekolah Menengah Pertama Negeri (SMPN) 1 Gisting pada tahun 2015-2018, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) Muhammadiyah Gisting pada tahun 2018-2021.

Penulis terdaftar sebagai mahasiswa baru di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) pada tahun 2021 dan mengambil konsentrasi keilmuan bidang Fisika Energi. Penulis menjadi anggota Sains dan Teknologi Himpunan Fisika Unila pada periode 2022. Penulis telah menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT PLN Indonesia Power Kamojang POMU PLTP Ulubelu pada tahun 2024 dengan judul “Identifikasi Performance Turbin PLTP Terhadap Pola Pengoperasian Unit 1 (Studi Kasus PT PLN Indonesia Power Kamojang POMU PLTP Ulubelu)”. Penulis juga telah melakukan program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung pada tahun 2024 di Lampung Timur. Selanjutnya penulis melakukan penelitian di PT PLN Indonesia Power Kamojang POMU PLTP Ulubelu dengan judul “Analisis Pengaruh Laju Massa Uap Terhadap Efisiensi Kinerja Turbin Uap Pada Pembangkit Listrik Panas Bumi Ulubelu”.

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya. Dia mendapat (pahala) dari (kebijakan) yang dikerjakannya dan mendapat (siksa) dari (kejahatan) yang diperbuatnya”

(Q.S Al-Baqarah : 286)

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan. Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan”

(Q.S Al-Insyirah : 5-6)

“Hatiku tenang mengetahui apa yang melewatkan ku tidak akan pernah menjadi takdirku, dan apa yang ditakdirkan untukku tidak akan pernah melewatkan ku”

(Umar bin Khatab)

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT, kupersembahkan karya kecil ini kepada:

Kedua Orang Tuaku
Bapak Marjono & Ibu Homsiyah

Sudah membimbing, mendidik, menemani dan menyemangati putrimu dengan kelembutan do'a dan kasih sayang. Terimakasih atas restu yang tiada hentinya dari dulu, sekarang hingga nanti.

Keluarga Besar dan Sahabat serta Rekan-Rekan Seperjuangan FISIKA
FMIPA UNILA 2021

Terimakasih atas segala dukungan yang telah diberikan sehingga dapat tetap bertahan dalam suka maupun duka

Almamater Tercinta
UNIVERSITAS LAMPUNG

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Analisis Pengaruh Laju Massa Uap Terhadap Efisiensi Kinerja Turbin Uap Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Ulubelu”** yang merupakan syarat untuk meraih gelar Sarjana Sains (S.Si) pada bidang Energi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Skripsi ini membahas tentang pengaruh laju massa uap terhadap peningkatan efisiensi kinerja turbin uap yang dipengaruhi oleh beberapa faktor. Selain laju massa uap, faktor lain yang mempengaruhi efisiensi turbin uap adalah suhu dan tekanan uap yang masuk ke turbin. Semakin tinggi suhu dan tekanan uap, maka efisiensi termal pembangkit listrik tenaga uap akan meningkat.

Pada penulisan skripsi ini, penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan baik dalam isi maupun cara penyajian. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak demi perbaikan dan penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan menambah pengetahuan bagi penulis maupun pembaca.

Bandar Lampung, 23 Juni 2025
Penulis,

Dea Fitrianingsih

SANWACANA

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT. yang maha segalanya, atas seluruh curahan rahmat dan hidayah Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Analisis Pengaruh Laju Massa Uap Terhadap Efisiensi Kinerja Turbin Uap Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Ulubelu”**. Terwujudnya skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, baik berupa tenaga maupun pemikiran. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis haturkan terimakasih kepada:

1. Bapak Drs. Pulung Karo Karo, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama yang telah memberikan bimbingan dan arahan serta ilmunya.
2. Bapak Drs. Amir Supriyanto, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Kedua yang telah memberikan bimbingan dan motivasi sehingga skripsi ini menjadi lebih baik sampai akhir penulisan.
3. Ibu Dr.Yanti Yulianti, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji, terimakasih telah mengoreksi kekurangan dan memberikan kritik serta saran pada seminar-seminar terdahulu.
4. Bapak Dr.Junaidi, S.Si., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan dan bantuan selama penulis menempuh studi di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.
5. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., Eng., selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
6. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
7. Seluruh *staff* yang ada di PT PLN *Indonesia Power* Kamojang POMU PLTP Ulubelu yang telah membantu penulis selama melaksanakan Praktik Kerja Lapangan sampai dengan penelitian tugas akhir.

8. Cinta pertama dan panutanku, Bapak Marjono dan pintu surgaku Ibu Homsiyah. Terimakasih atas segala pengorbanan dan tulus kasih yang diberikan. Beliau memang tidak sempat merasakan pendidikan di bangku perkuliahan, namun mereka senantiasa mampu memberikan yang terbaik, tak kenal lelah mendoakan serta memberikan perhatian dan dukungan hingga penulis mampu menyelesaikan studinya sampai meraih gelar sarjana.
9. Kakak saya Eka Endah Lestari dan suaminya Rizki Hermawan terimakasih banyak atas dukungannya secara moril maupun materil, terimakasih juga atas segala motivasi dan dukungannya yang diberikan kepada penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan studinya sampai sarjana.
10. Keponakan saya Shabira Maiza Hermawan, terimakasih atas kelucuan-kelucuan yang membuat penulis semangat dan selalu membuat penulis senang, sehingga penulis semangat untuk mengerjakan skripsi ini sampai selesai.
11. Sahabat saya yaitu Anggun Febriyanti, Sinta Damayanti, Muhammad Rifky dan Novellia Vanessa yang sudah memberi penulis dukungan dan semangat selama pengerjaan skripsi ini.
12. Ela Nur Asyifa, Divalyu Alamona dan Ela Amelia yang telah berjuang bersama, saling mendengarkan keluh kesah dan memberikan semangat kepada penulis.
13. Terakhir, untuk diri saya sendiri. Apresiasi sebesar-besarnya yang telah berjuang untuk menyelesaikan apa yang telah dimulai. Sulit bisa bertahan sampai dititik ini, terimakasih untuk tetap hidup dan merayakan dirimu sendiri, walaupun sering kali putus asa atas apa yang sedang diusahakan. Tetaplah menjadi manusia yang mau berusaha dan tidak lelah untuk mencoba.

Bandar Lampung, 23 Juni 2025

Penulis

Dea Fitrianingsih

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
LEMBAR JUDUL	iv
LEMBAR PERSETUJUAN	v
LEMBAR PEMGESAHAN	vi
PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP.....	viii
MOTTO	ix
PERSEMBAHAN	x
KATA PENGANTAR	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
 I. PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Masalah	5
 II. TINJAUAN PUSTAKA	 6
2.1 Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi	6
2.2 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi	9

2.3 Sistem Konversi Listrik di PT PLN PLTP Ulubelu	11
2.4 Turbin Uap	16
2.5 Klasifikasi Turbin Uap	18
2.6 Komponen Utama Pada Turbin Uap	19
2.7 Prinsip Kerja Turbin	22
2.8 Efisiensi Turbin	23
III. METODE PENELITIAN	25
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	25
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	25
3.2.1 Alat Penelitian	25
3.2.2 Bahan Penelitian	26
3.3 Prosedur Penelitian	26
3.3.1 Teknik Pengumpulan Data	26
3.3.2 Analisis Data	26
3.4 Diagram Alir	31
IV. METODE PENELITIAN	32
4.1 Hasil Analisis Laju Massa Uap Terhadap Efisiensi Turbin	32
4.2 Hubungan Laju Massa Uap dengan Efisiensi Turbin	43
4.3 Pengoperasian Turbin Uap	45
V. SIMPULAN DAN SARAN	48
5.1 Simpulan	48
5.2 Saran	49
DAFTAR PUSTAKA	50
LAMPIRAN	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. <i>Combined Cycle</i>	8
2. Siklus <i>Power Plant</i>	9
3. Turbin dan Generator	11
4. <i>Condenser</i>	12
5. Demister	12
6. <i>Cooling Tower</i>	13
7. Transformator	13
8. <i>Atmosphere Flash Vessel</i>	14
9. <i>Main Control Valve</i>	14
10. Turbin <i>Impuls</i>	18
11. Turbin Reaksi	19
12. Cover Turbin	19
13. <i>Turbine Control Valve</i>	20
14. <i>Turbine Stop Valve</i>	20
15. <i>Rotor Turbine</i>	21
16. <i>Turning Gear</i>	21
17. <i>Bearing Turbine</i>	22
18. Komponen Utama Turbin	22
19. Grafik Efisiensi dengan Laju Massa Uap	30
20. Diagram Alir Turbin Uap	31
21. Pencarian Nilai Entalpi dan Entropi <i>Saturated</i>	34
22. Grafik Hubungan Laju Massa Uap dengan Efisiensi Turbin	44

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Spesifikasi Turbin Uap PLTP Ulubelu	17
2. Alat Penelitian	25
3. Bahan Penelitian	26
4. Parameter Pada Sistem PLTP Ulubelu	27
5. Data Pengamatan	33
6. Data Tekanan Uap Masuk, Entalpi dan Entropi pada <i>Unit 2</i>	35
7. Data Tekanan Uap Keluar, Entalpi dan Entropi pada <i>Unit 2</i>	37
8. Hasil Perhitungan	39

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam era globalisasi dan ilmu teknologi yang terus berkembang, energi listrik menjadi suatu kebutuhan penting yang harus dipenuhi suatu bangsa. Di Indonesia, energi listrik dikelola oleh PT PLN (Persero) untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat maupun dunia usaha. Indonesia memiliki potensi panas bumi yang sangat besar, karena diperkirakan 40% cadangan panas bumi di dunia ada di Indonesia. Pemanfaatan panas bumi sebagai sumber energi listrik sudah cukup lama dimanfaatkan oleh manusia. Salah satunya PT PLN Indonesia *Power PLTP Ulubelu* yang memanfaatkan uap panas bumi untuk menggerakkan turbin uap. Sebagaimana kita ketahui bahwa turbin uap merupakan komponen penting dalam sistem pembangkitan listrik energi kinetik dari nosel yang menyembrotkan uap supaya terjadi energi gerak *angular* yang berguna untuk memutar poros dari generator. Sehingga efisiensi pembangkit tenaga listrik dipengaruhi oleh kinerja turbin (Sihombing, 2020).

PT PLN (Persero) terus mengembangkan jaringan listriknya dengan mendirikan pembangkit-pembangkit listrik di beberapa daerah di Indonesia, salah satunya yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi di daerah Ulubelu Kabupaten Tanggamus Provinsi Lampung. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi merupakan bentuk pemanfaatan energi dari sumber daya alam yang dapat terbarukan yakni energi panas bumi. Pada pembangkit listrik tenaga panas bumi, uap sebagai penggerak turbin diperoleh dari *reservoir* panas bumi yang terdapat dibawah permukaan tanah. Uap tersebut keluar melalui sumur-sumur produksi, kemudian dialirkan ke unit pembangkit listrik, *power plant*, dengan menggunakan sistem perpipaan. Memasuki bagian turbin,

uap berekspansi menghasilkan kerja mekanis berupa putaran turbin. Dengan mekanisme *coupling*, putaran turbin tersebut diteruskan memutar *rotor unit electric generator* sehingga menghasilkan energi listrik. PLTP Ulubelu adalah pembangkit listrik terbaru yang memanfaatkan panas bumi sebagai sumber pembangkitnya. PLTP Ulubelu dengan kapasitas $2 \times 55 \text{ MW}$ merupakan pembangkit tenaga listrik PT PLN (Persero) yang menggunakan energi terbarukan, panas bumi dan gas. Dengan dimanfaatkannya energi panas bumi sebagai pembangkit tenaga listrik akan mengurangi penggunaan bahan bakar fosil sebagai bahan bakar pembangkit listrik, sehingga pembangkit tenaga listrik PLN berorientasi ramah lingkungan. Sumber panas yang ada didalam bumi menghasilkan energi panas yang dikenal sebagai energi panas bumi, yang ditemukan di bawah permukaan bumi. Energi panas ini, yang sebagian besar berasal dari penyerapan panas matahari di permukaan bumi, dihasilkan oleh proses tektonik internal. Lebih lanjut, peluruhan unsur radioaktif di bawah permukaan, panas yang dihasilkan oleh tenggelamnya logam berat ke inti bumi, dan pengaruh medan elektromagnetik yang terkena dampak medan magnet Bumi merupakan beberapa fenomena yang berkontribusi terhadap sumber panas yang ada didalam bumi. Sumber energi ini merupakan energi baru terbarukan yang mengeluarkan sedikit gas rumah kaca dan dapat memasok energi secara terus menerus tanpa bergantung pada cuaca atau musim adalah panas bumi (Samosir, 2019).

Pada sistem PLTP Ulubelu *Unit 1* dan *2* mempergunakan turbin jenis *Single Casing Condensing Reaction Type*. Turbin tersebut dapat menghasilkan rate output sebesar 55.000 kW dengan putaran 3000 rpm. Turbin uap memanfaatkan energi fluida berupa entalpi uap yang mempunyai tekanan dan temperatur tinggi. Dalam memproduksi uap menjadi listrik, uap dengan tekanan tertentu masuk ke turbin yang kemudian dikonversi dari energi kinetik menjadi energi mekanik berupa putaran poros turbin untuk memutar generator dan menghasilkan listrik. Energi listrik yang dihasilkan dapat mencapai kualitas yang maksimal apabila efisiensi kerja turbin besar. Efisiensi kerja turbin merupakan nilai perbandingan antara kerja aktual yang dihasilkan dan kerja isentropis dari turbin (Sidiq & Anwar, 2021).

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi adalah tenaga listrik yang dihasilkan dari gerak turbin yang digerakkan oleh panas bumi. Cara pemanfaatannya adalah dengan membuat sumur yang kedalamannya mencapai titik panas bumi, lalu panas tersebut dialirkan ke lokasi turbin untuk menggerakkan turbin. Potensi tenaga panas bumi yang besar di Indonesia menjadikan pembangunan PLTP sebagai salah satu prioritas nasional bidang energi. Perkembangan teknologi yang semakin pesat membuat kebutuhan tenaga listrik yang semakin meningkat, baik kebutuhan di bidang industri, perdagangan, maupun kebutuhan listrik rumah tangga. Energi listrik tidak dapat dipisahkan dari kehidupan masyarakat yaitu semakin berkembangnya teknologi didasari oleh aktivitas manusia yang semakin banyak dan beraneka-ragam jenis kerumitannya (Marry *et al.*, 2017). Salah satu perkembangan yang dilakukan Perusahaan Listrik Negara adalah Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi adalah tenaga listrik yang dihasilkan dari gerak turbin yang digerakkan oleh panas bumi. Pemanfaatannya adalah dengan membuat sumur yang kedalamannya mencapai titik panas bumi, lalu panas tersebut dialirkan ke lokasi turbin untuk menggerakkan turbin.

Turbin uap adalah komponen utama dalam siklus Rankine di PLTP, di mana energi panas yang dihasilkan dari reservoir panas bumi diubah menjadi energi mekanis untuk menggerakkan generator listrik. Efisiensi kinerja turbin uap sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satunya adalah laju massa uap yang masuk ke turbin. Laju massa uap ini merupakan salah satu parameter penting yang menentukan kemampuan turbin dalam menghasilkan tenaga mekanis yang maksimal. Perubahan laju massa uap dapat berdampak langsung terhadap efisiensi energi yang dihasilkan, serta pengoperasian sistem secara keseluruhan. Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi efisiensi turbin adalah laju alir massa uap. Semakin besar laju massa uap yang masuk ke turbin maka putaran poros turbin yang dihasilkan semakin cepat, yang belum tentu menghasilkan efisiensi kerja turbin yang besar. Melalui analisa efisiensi ini dapat diketahui sebuah turbin masih beroperasi secara maksimal berdasarkan nilai efisiensi kerja turbin yang dihasilkan. Penelitian mengenai pengaruh laju massa uap terhadap efisiensi kinerja turbin uap sangat penting untuk memahami bagaimana parameter ini dapat

mempengaruhi efisiensi operasional PLTP. Dengan memahami keterkaitan antara laju massa uap dan efisiensi turbin, diharapkan dapat ditemukan cara untuk mengoptimalkan proses, meningkatkan efisiensi energi, serta mengurangi biaya operasi dan dampak lingkungan (Yuniarti, 2012).

Berdasarkan uraian diatas, maka penulis mengambil judul mengenai “**Analisis Pengaruh Laju Massa Uap Terhadap Efisiensi Kinerja Turbin Uap Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Ulubelu**” yang akan membahas tentang besarnya kapasitas daya turbin uap.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, rumusan masalah yang membatasi aspek utama dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh laju massa uap terhadap efisiensi turbin uap pada pembangkit listrik tenaga panas bumi?
2. Apakah terdapat hubungan linier antara peningkatan laju massa uap dengan peningkatan efisiensi turbin uap?
3. Faktor-faktor apa saja yang mempengaruhi hubungan antara laju massa uap dan efisiensi turbin uap pada pembangkit listrik tenaga panas bumi?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menganalisis pengaruh laju massa uap terhadap efisiensi turbin uap pada pembangkit listrik tenaga panas bumi.
2. Menentukan hubungan antara perubahan laju massa uap dengan efisiensi turbin.
3. Memberikan rekomendasi terkait pengoperasian turbin uap yang optimal dalam hal laju massa uap untuk meningkatkan efisiensi turbin.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian diperoleh dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Sebagai pengetahuan dan informasi penting mengenai bidang energi dan menjadi sumber referensi untuk penelitian berikutnya dari hasil yang telah diselesaikan pada penelitian ini.
2. Pengetahuan untuk peneliti di bidang pembangkit listrik panas bumi khususnya turbin dan pengalaman dalam mengasah keterampilan menulis ketika melakukan penelitian.
3. Untuk institusi PT PLN Indonesia *Power* Kamojang POMU PLTP Ulubelu bisa dijadikan referensi dalam mengetahui pengaruh laju massa uap terhadap efisiensi kinerja turbin.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini antara lain sebagai berikut.

1. Penelitian ini dibatasi pada pembangkit listrik tenaga panas bumi jenis *single flash* yang menggunakan turbin uap sebagai penggerak generator.
2. Penelitian ini hanya menganalisis pengaruh laju massa uap terhadap efisiensi kinerja turbin selama 7 hari di PT PLN Indonesia *Power* Kamojang POMU PLTP Ulubelu *Unit* 2.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi

Kandungan panas di lapangan panas bumi akan menentukan teknologi pembangkit listrik yang akan digunakan. Pembangkit listrik dari sumber daya panas bumi diperlukan sumber daya dengan kandungan panas yang tinggi hingga sedang. Pembangkit listrik tenaga panas bumi saat ini memiliki empat teknologi antara lain sebagai berikut:

1. *Direct dry steam plants*

Tergantung pada suhu dan tekanan di bawah permukaan bumi, fluida di PLTP dapat bertransisi menjadi fase cair, fase uap, atau kombinasi keduanya. Uap dari sumur dapat diarahkan langsung menuju turbin jika ada dalam bentuk tersebut. Energi panas bumi akan diubah oleh turbin menjadi energi kinetik yang akan menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik (Prananto *et al.*, 2018). Metode paling sederhana dan terjangkau adalah konversi uap langsung. Di dalam kondensor, uap yang berasal dari turbin akan mengembun. Setelah itu, kondensat akan menuju menara pendingin dan kemudian kembali ke kondensor.

2. *Flash Steam*

Flash steam merupakan jenis PLTP yang paling umum saat ini. *Flash steam* mirip dengan pembangkit listrik *direct dry steam*. Namun, uap tersebut diperoleh dari proses pemisahan yang disebut *flashing*. Temperatur fluida turun jika tekanan diturunkan, sehingga *flash steam* bekerja paling baik pada temperatur sumur lebih dari 180°C. *Flash steam* terbagi menjadi beberapa tipe antara lain:

a. *Single flash*

Dua fase yang dihasilkan selama proses pembangkitan listrik di lapangan panas bumi adalah campuran uap dan air. Dalam separator atau demister, fluida sumur dibagi menjadi fase uap dan air, yang selanjutnya uap diarahkan menuju turbin. Setelah digunakan dalam produksi listrik, kondensor memompa uap dari turbin ke menara pendingin, di mana uap tersebut selanjutnya disirkulasikan untuk membantu kondensasi uap yang keluar dari turbin. Pada penelitian ini dilakukan di PT PLN Indonesia Power Kamojang POMU PLTP Tanggamus yang mana berdampingan dengan PGE Ulubelu Lampung yang menggunakan sistem *single flash* (Atmanto, 2015).

b. *Double flash*

Siklus ini menggunakan dua jenis turbin bertekanan tinggi dan turbin bertekanan rendah yang disusun berganda. Ada dua tahap pemisahan fluida, yang dilakukan melalui penggunaan separator dan *flasher*. Separator digunakan untuk memisahkan uap bersuhu tinggi dan bertekanan tinggi yang masih mengandung air, menghasilkan uap kering yang menggerakkan turbin bertekanan tinggi. Energi panas bumi akan diubah menjadi energi kinetik oleh turbin, yang akan menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. Uap dihasilkan dengan mengalirkan air dari separator yang suhu dan tekanannya lebih rendah dibandingkan sumur asal ke *flasher*. Setelah itu, turbin bertekanan rendah menerima uap yang dihasilkan, beserta sisa uapnya (Pambudi *et al.*, 2015).

c. *Triple Flash*

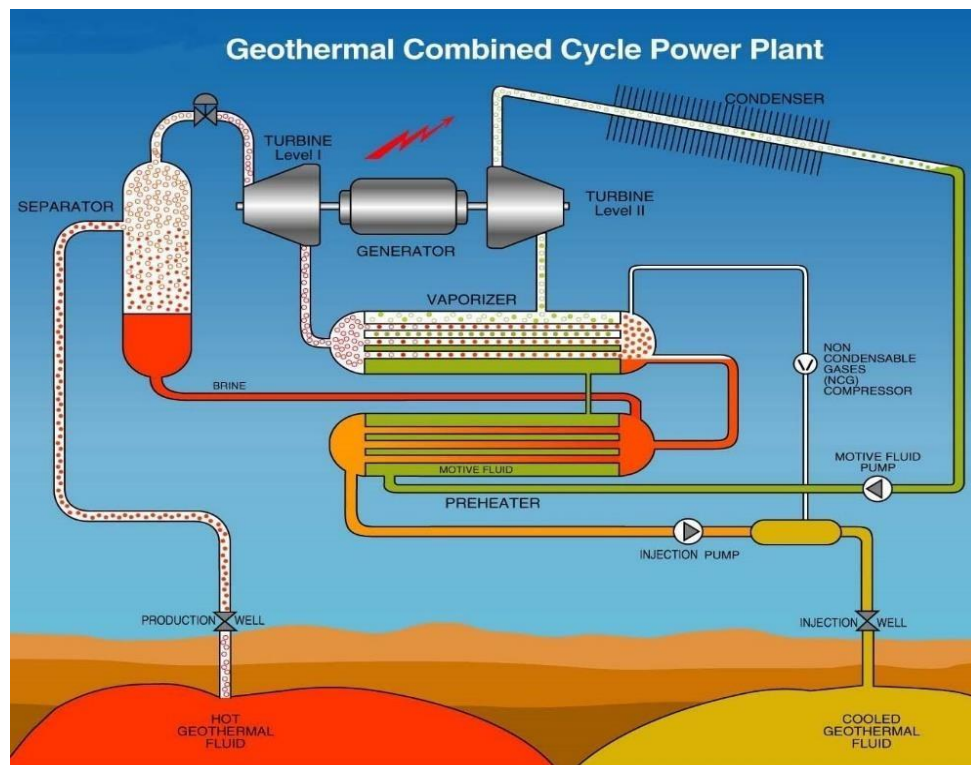
Triple flash adalah siklus konversi yang terbaru dalam pemanfaatan pembangkit listrik tenaga panas bumi. *Triple flash* merupakan gabungan dari *single flash* dan *double flash* yang berfungsi untuk mengekstrak secara optimal energi panas *brine separator* sehingga menghasilkan energi listrik yang lebih tinggi. Dalam proses ekstrak tersebut jumlah fluida yang telah diinjeksikan dari separator menjadi lebih rendah, akan tetapi *steam* kondensat yang di injeksikan menjadi lebih tinggi (Abbas *et al.*, 2020).

d. *Binary Cycle*

Suhu fluida panas bumi yang digunakan untuk menghasilkan listrik biasanya 200°C . Di sisi lain, fluida panas bumi yang bersuhu antara 100 dan 200°C juga dapat digunakan untuk menghasilkan listrik panas bumi. Prosesnya melibatkan pemanasan cairan organik dengan titik didih rendah menggunakan cairan ini. Setelah itu, turbin digerakkan oleh uap yang dihasilkan oleh cairan organik tersebut untuk menghasilkan listrik. Mesin penukar panas digunakan untuk memanaskan cairan organik dengan memanfaatkan panas dari cairan panas bumi. Hanya panas yang dikeluarkan dari fluida panas bumi dan disuntikkan kembali ke dalam *reservoir* (Pasek *et al.*, 2011).

e. *Combined Cycle*

Pada siklus *combined cycle*, pemanfaatan *binary cycle* dipasang setelah separator keluar turbin bahkan kombinasinya. Siklus *combined cycle* merupakan siklus tertutup yang mana fluida yang diproduksi dari reservoir di injeksikan seluruhnya ke *reservoir*.

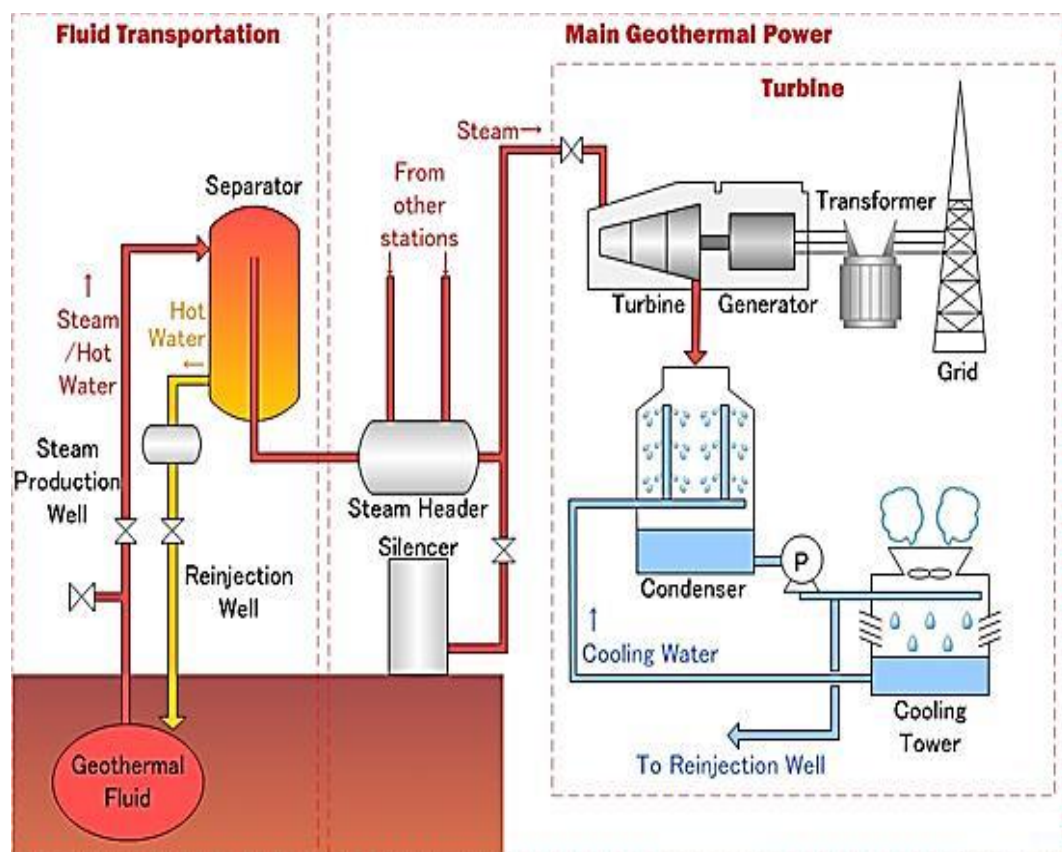


Gambar 2.1 *Combined Cycle* (Kusuma *et al.*, 2018)

Cairan akan dipisahkan antara kedua fasanya di dalam *separator*. Uap yang bertekanan tinggi dari *separator* menuju turbin 1, kemudian uap yang keluar dari turbin yang memiliki tekanan lebih rendah dipakai untuk menghasilkan cairan organik menggunakan *heat exchanger*. Uap dari fluida organik ini dialirkan menuju turbin 2 yang mempunyai tekanan yang lebih rendah. *Hot brine separator* dialirkan menuju *preheater* untuk memanaskan fluida kerja dalam fasa cair setelah keluar dari kondensor (Kusuma *et al.*, 2018).

2.2. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi

Pada PLTP Tanggamus memiliki teknologi dengan sistem *single flash* dimana sistem ini melewati satu kali *flashing*. Pada PLTP Tanggamus menerima *supply* uap dari Pertamina *Geothermal Energy* unit 3 dan 4. Kemudian, uap tersebut akan dikirim menuju PLTP Tanggamus unit 1 dan 2.



Gambar 2.2 Siklus Power Plant (Setya & Suparman, 2020)

PLTP Ulubelu menerima *supply* uap dari PGE yang mana uap masuk menuju *repture disk*. *Repture disk* berfungsi untuk melindungi sistem dari tekanan yang berlebih. Selanjutnya uap akan menuju demister yang mana fungsi demister memisahkan antara fasa uap dan fasa cair. Fasa cair akan dikirim menuju *atmosphere flash vessel* yang berfungsi untuk membuang panas ke atmosfer dan selanjutnya akan masuk kedalam sump pit yang mana memaksimalkan kembali pendingin air untuk dialirkan kembali menuju *reinjection* satling basin. Sedangkan, untuk fasa uap kering akan langsung dialirkan menuju turbin akan tetapi sebelum menuju turbin ada beberapa alat yang akan di lewati uap antara lain *main stop valve* dan *main control valve*.

Main stop valve berfungsi untuk menghentikan aliran uap menuju turbin jika turbin mengalami trip. *Main control valve* berfungsi untuk mengatur laju aliran uap yang akan masuk ke turbin sesuai dengan pembebanan. Selanjutnya uap akan menciptakan energi mekanik pada turbin lalu menghasilkan listrik yang mana turbin dan generator dikapal menjadi satu. Uap sisa dari turbin akan masuk menuju kondensor dan akan dilakukan kondensasi dengan tujuan uap bisa digunakan kembali. Air yang telah di kondensasi di kondensor akan dialirkan oleh *Hot well pump* menuju *cooling tower* untuk didinginkan. Air yang sudah didinginkan akan disirkulasikan kembali ke kondensor untuk membantu proses kondensasi dan mendinginkan kondensor.

Pada saat proses kondensasi pada kondensor terutama dalam kandungan uap, tidak semua bisa terkondensasi, yang tidak bisa terkondensasi itulah yang disebut dengan *non condensable gas*. NCG jika tidak dikeluarkan dari kondensor maka tekanan kondensor akan naik. NCG ditarik oleh *ejector* dengan bantuan steam utama dan akan di alirkan menuju interkondensor. Interkondensor memiliki fungsi yang sama dengan kondensor yaitu melakukan kondensasi terhadap NCG dan steam utama yang mana sisa NCG akan dialirkan kembali menuju separator dan fasa cair akan disirkulasikan kembali ke kondensor. NCG yang ada didalam interkondensor akan ditarik atau divakum oleh *vacump pump* dan selanjutnya akan dialirkan menuju separator. Separator memiliki fungsi yang sama dengan interkondenser yang mana mengkondensasi antara NCG dan fasa cair. Fasa cair

dari separator akan di sirkulasi kembali menuju kondensor sedangkan NCG dari separator akan dialirkan menuju *cooling tower* dan akan di buang ke atmosfer. Air yang telah didinginkan oleh *cooling tower* juga akan di alirkan menuju *primary auxilliary cooling water* dan *secondary auxilliary cooling water*. PACW akan membantu proses pendinginan pada *heat exchanger*, *intercondenser*, *vacump pump*, dan separator. Sedangkan, SACW membantu proses pendinginan *lube oil cooler* dan generator *air cooler* (Harefa, 2023).

2.3 Sistem Konversi Listrik di PT PLN PLTP Ulubelu

1. Turbin dan Generator

Turbin adalah alat yang berfungsi untuk mengubah energi panas dari uap menjadi energi mekanik sebagai penggerak generator untuk menghasilkan listrik. Uap yang dimasukkan kedalam turbin akan masuk ke dalam sudu-sudu gerakannya sehingga akan terjadi perubahan momentum dan akan ada gaya memutar porosnya. Pada PT PLN PLTP Ulubelu turbin uap menghasilkan daya listrik 55 MW dengan *type Single Casing Condensing Reaction Type* dan *merk Fuji Electric*. Untuk satu unit memiliki putaran sebesar 3000 rpm dengan *preassure* sebesar 7,6 bar abs dan *temperature* sebesar 168.3°C. Sedangkan generator berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dan untuk aliran uap yang berasal dari *demister* akan di alirkan menuju turbin dan aliran ini akan di kontrol oleh *main control valve* (Yuniarti, 2012).



Gambar 2.3 Turbin dan Generator

2. Condenser

Condenser berfungsi untuk mengubah uap air yang keluar dari turbin menjadi air. Proses perubahan fasa dari gas menjadi cair di dalam *condenser*

dipengaruhi oleh banyak faktor. Uap akan di kondensasi untuk dimanfaatkan sebagai air pendingin dan pemasok air didalam perut bumi.



Gambar 2.4 *Condenser*

3. *Demister*

Setelah melewati *Rapture Disk*, menuju *demister* yang berfungsi untuk memisahkan fasa *steam* menjadi fasa air, dimana diharapkan akan menghasilkan keluaran uap kering sebagai media pemutar turbin.



Gambar 2.5 *Demister*

4. *Cooling Tower*

Cooling tower adalah sistem dalam PLTP yang bertujuan untuk memproses sirkulasi air pendingin utama yang berasal dari *condenser*. Kemudian didinginkan pada *cooling tower* untuk disirkulasikan kembali ke *condenser*. Pada PT PLN Indonesia Power PLTP Ulubelu *cooling tower* adalah sebuah menara pendingin air yang berfungsi untuk mendinginkan air kondensat dari *condenser*, *cooling tower* berfungsi mendinginkan air melalui kontak langsung dengan udara yang mengakibatkan sebagian kecil air menguap. Kemampuan *cooling tower* dalam menghasilkan air pendingin biasanya dinyatakan dalam *range* dan *approach* (Yohana *et al*, 2017).



Gambar 2.6 *Cooling Tower*

5. Transformator

Transformator adalah suatu peralatan listrik yang berfungsi untuk memindahkan atau mengubah energi listrik dari satu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya juga untuk mengirimkan daya listrik, dari yang bertegangan tinggi untuk menjadi tegangan rendah. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.7 adalah gardu induk dari PLTP Ulubelu yang menghasilkan daya sebesar 2×55 MW. Prinsip kerja dari *transformator* didasarkan pada Hukum *Ampere* dan Hukum *Faraday*. Ketika arus AC dialirkan ke salah satu kumparan trafo, jumlah garis medan magnet berubah. Ini menghasilkan *lead* di sisi utama. Sekunder menerima garis gaya magnet dari primer, yang jumlahnya berubah, dan sekunder juga memiliki induksi, menghasilkan perbedaan di tegangan.



Gambar 2.7 Transformator

6. *Atmosphere Flash Vessel dan Sump Fit*

Aliran air panas yang berasal dari *demister* akan dialirkan menuju *atmosfer flash vessel*, seperti pada gambar dibawah dimana tempat ini berfungsi untuk memisahkan sisa uap dari air panas yang mengalir dari *demister* yang

nantinya akan di buang ke atmosfer, sisa aliran akan dimasukkan ke dalam *sump pit*, yang berfungsi sebagai tempat atau kolam penampungan air yang didalamnya akan berfungsi untuk mendinginkan air yang akan di alirkan menuju *reinjection salting basin*.



Gambar 2.8 *Atmosphere Flash Vessel*

7. *Main Control Valve*

Main control valve berfungsi sebagai pengontrol aliran fluida dengan mengubah dan memvariasikan ukuran dari aliran sesuai dengan yang diperintah oleh sinyal server, yang mana laju aliran ini juga untuk mengatur proses seperti, tekanan, suhu, dan tingkat cairan.



Gambar 2.9 *Main Control Valve*

8. *Rupture Disk*

Sebelum uap dimasukkan menuju *demister*, uap akan melewati *rupture disk* terlebih dahulu, *Rupture disk* bisa diartikan sebagai piringan atau pengaman atau pelepas tekanan yang tidak tertutup seperti yang terlihat pada gambar dibawah dimana fungsi lain dari *Rupture disk* ini adalah untuk melindungi bejana tekan atau melindungi peralatan dan sistem tekanan yang berlebihan yang berpotensi untuk merusak vakum (Lee *et al.*, 2011).

9. *Ejector dan Intercondenser*

Pada PT PLN Indonesia Power Kamojang POMU PLTP Ulubelu, *Ejector* adalah sebuah alat yang berfungsi untuk mendorong gas H_2S , dengan tipe *multi nozzle steam jet ejector*, dengan kuantitas 2 set, namun hanya 1 set yang *stand-by*. *Non condensable gas* merupakan gas yang tidak bisa terkondensasi, gas ini berasal dari *condenser* akan mengalir melalui *ejector* untuk menuju ke dalam *intercondenser*, dan *intercondenser* berfungsi untuk membantu *condenser* dalam pembuangan NCG dan memisahkan NCG dengan air secara sempurna. NCG akan dialirkan menuju *cooling tower* lalu akan terbuang ke udara, dan air hasil kondensasi dari pemisahan *intercondenser* akan dimasukkan ke dalam *condenser* kembali.

10. *Heat Exchanger*

Heat Exchanger adalah alat penukar panas yang berfungsi untuk mengubah temperatur dan fasa suatu jenis fluida. Proses tersebut terjadi dengan memanfaatkan proses perpindahan kalor dari fluida bersuhu tinggi menuju fluida bersuhu rendah. Pada PT PLN PLTP Ulubelu *heat Exchanger* berfungsi untuk mendinginkan air atau oli yang digunakan sebagai pendingin turbin dan generator, air yang berasal dari *cooling tower* akan dialirkan melalui pompa *primary cooling auxiliary water* (PACW) untuk menuju *heat exchanger* air dan oli panas yang berasal dari turbin dan generator dengan melewati aliran pompa *secondary auxiliary water* (SACW), dan di dalam *heat exchanger* akan terjadi ekraksi termal (Muharrir & Hajar, 2019).

11. *Flash Steam Power Plants*

Flash steam power plants panas bumi berupa fluida misalnya air panas alam di atas suhu $1750^{\circ}C$ dapat digunakan sebagai sumber pembangkit *flash steam power plant*. Fluida panas tersebut dialirkan kedalam tangki *flash* yang tekanannya lebih rendah sehingga terjadi uap panas secara cepat. Uap panas yang disebut dengan *flash* inilah yang menggerakkan turbin untuk mengaktifkan generator yang kemudian menghasilkan listrik. Sisa panas yang tidak terpakai masuk kembali ke *reservoir* melalui *injection well* (Romadhon, 2017).

12. *Reinjection settling basin & reinjection pump*

Pada PT PLN PLTP Ulubelu *reinjection well* disebut dengan *reinjection settling basin* yang berfungsi sebagai tempat atau kolam penampungan akhirnya berasal dari *atmosfer flash vassel* dan *cooling tower* yang berlebih, lalu fluida akan di pompa untuk di alirkan kembali menuju PGE untuk diinjekkan kembali dengan menggunakan *reinjection pump* (Ungemach, 2003).

2.4 Turbin Uap

Turbin uap adalah mesin penggerak, dimana energi fluida kerja digunakan langsung untuk memutar sudu pada turbin. Berbeda dengan yang terjadi pada mesin torak, pada turbin tidak terdapat bagian mesin yang bergerak translasi. Bagian turbin yang berputar dinamakan rotor atau sudu turbin, sedangkan bagian yang tidak bergerak dinamakan stator atau rumah turbin dan sudu turbin memutar poros daya yang menggerakkan atau memutar bebannya (Shlyakhin, 1993).

Turbin uap merupakan suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan energi kinetik ini selanjutnya diubah menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin langsung dihubungkan dengan mekanisme yang digerakkan. Tergantung pada jenis mekanisme yang digunakan, turbin uap dapat digunakan pada berbagai bidang seperti pada bidang industri, untuk pembangkit tenaga listrik. Pada proses perubahan energi potensial menjadi energi mekanisnya yaitu dalam bentuk putaran poros. Turbin uap modern pertama kali dikembangkan oleh Sir Charles Parsons pada tahun 1884. Pada perkembangannya, turbin uap ini mampu menggantikan peranan dari kerja mesin uap torak. Hal ini disebabkan karena turbin uap memiliki kelebihan berupa efisiensi thermal yang besar dan perbandingan dengan daya yang dihasilkan cukup tinggi. pada prosesnya turbin uap menghasilkan gerakan rotasi, sehingga hal ini sangat cocok digunakan untuk menggerakkan generator (Silanegara, 2019).

Persyaratan uap yang menuju ke turbin harus memiliki kekeringan 99%, kebasahannya 1% sedangkan NCG (*Non Condensable Gases*) 1%. Uap kering yang masuk ke turbin akan memutar bilah-bilah turbin, sehingga turbin yang terhubung dengan generator akan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Kemurnian uap yang akan masuk ke turbin perlu dijaga untuk mengurangi terbentuknya *scaling* pada permukaan sudu. *Scaling* akan mengurangi luas kontak antara uap dengan sudu, sehingga operator perlu memonitor tekanan *chamber* turbin apabila terjadi perbedaan yang signifikan antara keadaan awal dengan kondisi saat turbin sedang beroperasi. Spesifikasi turbin uap pada PLTP Ulubelu Unit 2 ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi Turbin Uap PLTP Ulubelu

Jenis Spesifikasi	Spesifikasi
<i>Type</i>	<i>Single Casing Condensing Reaction Type</i>
<i>Rate Output</i>	55.000 kW
<i>Inlet Steam Preassure</i>	7,6 bar
<i>Inlet Steam Temperature</i>	168,3 °C
<i>Exhaust Preassure</i>	0,1 bar
<i>Rated Speed</i>	3.000 rpm
<i>Direction of rotation</i>	<i>Clockwise (view from generator side)</i>
<i>Number of blade stages</i>	11 × 2 <i>flow</i>
<i>Last stage blade lenght</i>	696,8 mm
<i>Exhaust Connection to condenser (internal)</i>	2 × (2,150 mm × 5,100 mm)

Turbin uap adalah suatu penggerak yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan energi kinetik ini selanjutnya diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros turbin. Perubahan energi ini dilakukan dengan cara mengekspansikan uap tersebut pada sudu gerakannya. Ada empat bagian utama turbin uap, yaitu :

a. Stator

Stator merupakan bagian turbin uap yang tidak berputar, seperti rumah turbin.

b. Rotor

Rotor merupakan bagian turbin uap yang berputar, pada rotor diletakkan sudu-sudu gerak turbin.

c. Sudu Gerak

Sudu gerak merupakan tempat pengkonversian energi kinetik menjadi energi mekanis.

d. Nosel

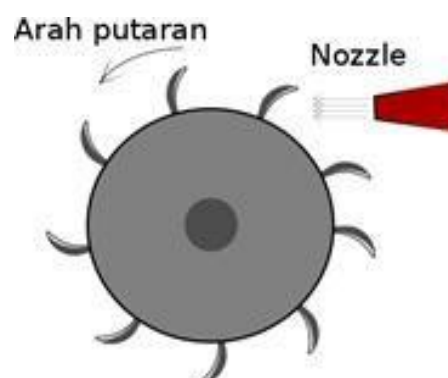
Nosel adalah suatu laluan yang luas penempangnya bervariasi yang didalam energi potensial uap dikonversikan menjadi energi kinetik. Nosel juga berfungsi sebagai pengarah aliran uap yang akan masuk ke sudu gerak, oleh sebab itu nosel disebut juga sebagai sudu pengarah (Mandyvo, 2020).

2.5 Klasifikasi Turbin Uap

Adapun klasifikasi turbin uap berdasarkan prinsip kerjanya adalah sebagai berikut :

1. Turbin Impuls

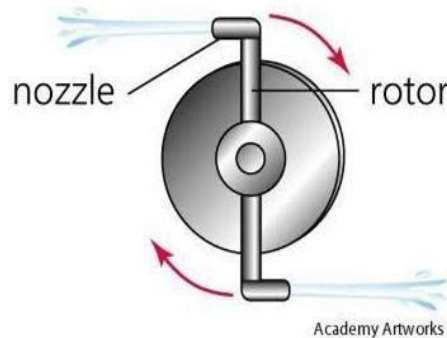
Turbin impuls atau turbin tahapan impuls adalah turbin sederhana berotor satu atau banyak (gabungan) yang mempunyai sudu-sudu pada rotor tersebut. Turbin ini mengubah arah dari aliran fluida berkecepatan tinggi menghasilkan putaran impuls dari turbin dan penurunan energi kinetik dari aliran fluida (Linda *et al.*, 2016).



Gambar 2.10 Turbin Impuls (Poernomo & Fasha, 2012)

2. Turbin Reaksi

Turbin reaksi disebut juga Turbin *Parson* adalah turbin dengan proses ekspansi (penurunan tekanan) yang terjadi baik di dalam baris sudu tetap maupun sudu gerak, energi termal uap diubah menjadi energi kinetik di sudu-sudu penghantar dan sudu-sudu jalan, dan kemudian gaya reaksi dari uap akan mendorong sudu-sudu untuk berputar (Septianto & Daryanto, 2017).



Gambar 2.11 Turbin Reaksi (Arismunandar, 2004)

2.6 Komponen Utama Pada Turbin

Secara umum komponen-komponen utama pada turbin uap adalah sebagai berikut.

1. Cover Turbine

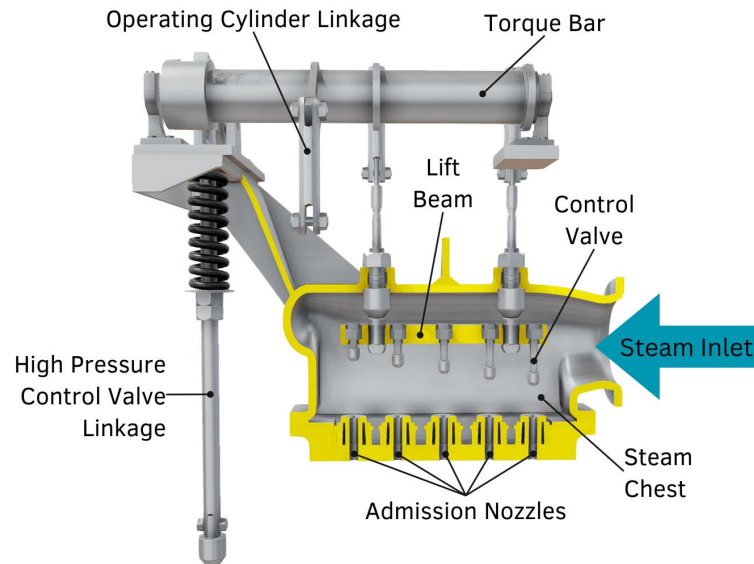
Casing pada turbin uap fungsi utamanya adalah untuk meletakkan semua komponen turbin uap pada posisinya agar performansinya sesuai dengan rancangan. Selain itu, fungsi *casing* pada turbin yaitu untuk tempat kedudukan dari stator atau sudu-sudu diam yang mengarahkan aliran uap pada sudu gerak (putar).



Gambar 2.12 Cover Turbine

2. Turbine Control Valve

Turbine Control Valve merupakan katup yang bertugas mengatur jumlah uap yang masuk ke dalam turbin sesuai dengan jumlah uap yang diperlukan.



Gambar 2.13 *Turbine Control Valve* (Paish, 2002)

3. Turbine Stop Valve

Turbine Stop Valve merupakan katup yang bertugas meneruskan atau menghentikan aliran uap yang masuk ke turbin. *Turbine Stop Valve* disebut juga sebagai *Emergency Stop Valve* karena berfungsi sebagai pengisolasi turbin dari suplai uap pada keadaan darurat untuk menghindari kerusakan atau juga *overspeed*.



Gambar 2.14 *Turbine Stop Valve* (Zidonis & George, 2020)

4. *Rotor Turbine*

Tidak ada turbin uap tanpa adanya rotor. Rotor adalah bagian turbin yang berputar dan jumlahnya cukup banyak. Ada dua bagian dari rotor yang ada di dalam turbin uap yaitu *Rotor Shaft* (berfungsi sebagai komponen untuk tempat pemasangan cakram-cakram sepanjang sumbu) dan *Rotor Blades* (berfungsi sebagai alat penerima gaya dari energi kinetik uap).



Gambar 2.15 *Rotor Turbine*

5. *Turning Gear*

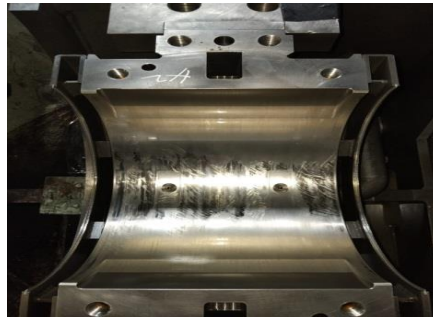
Turning gear adalah perangkat turbin uap yang berfungsi untuk memutar rotor turbin generator pada putaran rendah (5-10 rpm) yang fungsinya untuk menjamin pemanasan atau pendinginan rotor yang merata, sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya bengkok pada rotor. *Turning gear* terdiri dari motor dan roda gigi penurunan putaran (*reduction gear*) yang dapat dihubungkan ke roda gigi pada poros turbin. Penggerak akhir dari susunan gigi tersebut akan terputus hubungannya secara otomatis dengan roda gigi poros turbin, pada waktu kecepatan lebih tinggi dari kecepatan *motor turning gear*. Hal ini dimaksudkan untuk mencegah motor turning gear diputar oleh poros turbin.



Gambar 2.16 *Turning Gear*

6. *Bearing Turbine*

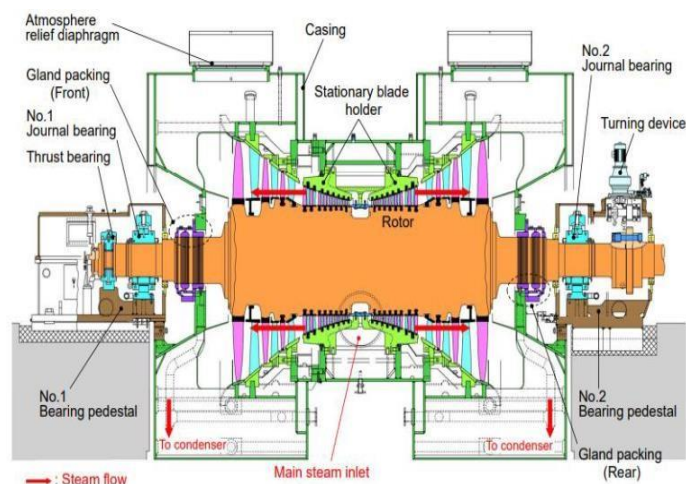
Bearing merupakan salah satu komponen pada PLTP yang berperan dalam menjaga posisi *turbine shaft* tetap berada dalam satu poros. Dalam pemeliharaan *bearing* turbin dilakukan sistem pendinginan pada bearing turbin yaitu pelumasan terhadap bearing dengan menggunakan oli. Pada pendinginan oli pelumas digunakan sistem pendingin jenis *heat exchanger type shell and tube* (Azevedo et al., 2016).



Gambar 2.17 *Bearing Turbine*

2.7 Prinsip kerja turbin

Pada lokasi penelitian ini yaitu PT PLN Indonesia *Power Kamojang* POMU PLTP Ulubelu menerima uap dari Pertamina *Geothermal Energy* kemudian uap akan menuju demister untuk dipisahkan antara uap kering dengan fasa air. Uap selanjutnya melewati *strainer* untuk disaring material atau kotoran yang mungkin terbawa oleh uap. Uap akan di atur laju aliran nya oleh *Main Control Valve* sesuai kebutuhan pembebanan.



Gambar 2.18 *Komponen Utama Turbin* (Damayanti, 2022)

Uap akan masuk melalui *main steam inlet* kemudian uap diarahkan oleh sudu turbin bagian *stationary* mengikuti lengkungan sudu agar bisa masuk ke sudu gerak. Pada bagian sudu gerak, uap akan menyebabkan rotor turbin berputar. Agar energi kinetik dimanfaatkan secara maksimal, maka turbin dipasang lebih dari satu sudu gerak yang mana terdapat sudu diam di antara kedua sudu gerak tersebut. Rotor turbin yang sudah di kopel dengan generator akan ikut bergerak maka terjadilah konversi energi kinetik menjadi energi listrik. Uap sisa dari turbin memiliki tekanan dan temperatur yang sudah turun akan mengalir menuju kondensor untuk dikondensasikan (Atmanto, 2015).

2.8 Efisiensi Turbin

Efisiensi merupakan salah satu persamaan yang penting dalam termodinamika untuk mengetahui seberapa baik proses konversi energi terjadi. Hal tersebut berhubungan dengan Hukum Termodinamika 1 yang menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan. Energi dalam suatu sistem bertambah atau berkurang karena perubahan bentuk energi yang satu menjadi bentuk energi yang lain di dalam sistem tersebut. Besarnya kerugian di dalam turbin akan mempengaruhi efisiensinya. Kerugian yang besar berarti efisiensinya rendah. Faktor-faktor penyebab kerugian didalam turbin yaitu pada katup pengontrol jumlah uap, kerugian pada Nosel, kerugian pada *moving blades*, kerugian pada uap saat meninggalkan *moving blades*, kerugian gesekan, kerugian celah, kerugian akibat kebasahan uap dan kerugian akibat kecepatan uap keluar turbin serta *external loss* atau kerugian luar (Mandyvo, 2020). Pengoperasian turbin uap secara terus-menerus dapat menyebabkan berbagai kerugian yang terjadi pada komponen turbin uap. Akibat kerugian- kerugian tersebut, maka energi listrik yang dihasilkan selalu lebih kecil dari energi termal yang masuk ke sistem turbin. Hal tersebut akan mempengaruhi efisiensi turbin uap. Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai efisiensi turbin uap antara lain laju alir massa, tekanan dan temperatur uap masuk turbin, serta tekanan dan temperatur uap keluar turbin. Temperatur dan kelembaban lingkungan yang lebih kecil menghasilkan daya keluaran yang besar (Linda *et al.*, 2016).

Laju alir massa uap adalah banyaknya uap yang mengalir per satuan waktu. Laju alir massa uap diatur oleh pengatur atau katup pada beban yang berbeda. Namun, efisiensi termal dan efisiensi isentropik turbin sangat bergantung pada penurunan tekanan. Jika tekanan uap masuk turbin menurun, maka laju massa uap yang masuk ke turbin juga menurun. Daya isentropik yang dihasilkan sebanding dengan laju aliran uap, sehingga memungkinkan untuk mengatur daya dengan mengubah parameter ini (Wahidah *et al.*, 2019).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di *Central Control Room* PT PLN Indonesia Power Kamojang POMU PLTP Ulubelu *Unit 2* pada bulan Oktober sampai dengan November 2024. Penelitian ini terdiri dari pengambilan data laju massa uap, laju uap masuk, temperatur, tekanan dan daya pada turbin.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Dalam analisis kali ini terdapat alat dan bahan yang digunakan untuk mendukung berjalannya proses penelitian ini antara lain :

3.2.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini dapat ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Alat Penelitian

No	Alat Penelitian	Fungsi
1.	<i>Rotor Turbine</i>	Sebagai penerima energi dari fluida
2.	<i>Cover Turbine</i>	Sebagai untuk tempat kedudukan dari stator atau sudu-sudu diam yang mengarahkan aliran uap pada sudu gerak
3.	<i>Turning Gear</i>	Sebagai pemutar rotor turbin generator pada putaran rendah (5-10 rpm) yang fungsinya untuk menjamin pemanasan atau pendingin rotor yang merata, sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya bengkok pada rotor.
4.	<i>Bearing Turbine</i>	Sebagai penjaga posisi <i>turbine shaft</i> tetap berada dalam satu poros (<i>center</i>).

3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini dapat ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Bahan Penelitian

No	Bahan Penelitian	Fungsi
1.	Oli Turbin	Sebagai pelumas <i>bearing</i> .

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan metode berupa destruktif kuantitatif melalui pengumpulan data-data lapangan. Tahap pengambilan data terdiri dari data tekanan uap masuk dan keluar turbin, data laju alir massa dan data spesifikasi turbin. Data tersebut kemudian digunakan untuk menghitung daya isentropis turbin dan efisiensi kerja turbin. Setelah itu dilakukan analisis pengaruh laju massa uap terhadap efisiensi kerja turbin dan mengetahui nilai efisiensi kinerja turbin di *unit 2* pada PLTP Ulubelu. Selain itu, dilakukan studi literatur dari beberapa jurnal dan penelitian sebelumnya.

3.3.1 Teknik Pengumpulan Data

Data yang diambil merupakan data primer yang diperoleh dari wawancara langsung dengan operator. Data primer berupa tekanan uap masuk dan keluar turbin, data laju alir massa, data spesifikasi turbin dan data operasi pada turbin *unit 2* di PLTP Ulubelu. Data ini diperoleh dengan sistem *Supervisory Control and Data Acquisition*.

3.3.2 Analisis Data

Analisis efisiensi turbin uap di PT PLN Indonesia Power Kamojang POMU PLTP Ulubelu diperlukan sebuah pengukuran antara laju massa uap dengan hasil efisiensi turbin uap, maka perlu adanya sebuah keseimbangan antara keduanya. Terdapat beberapa parameter yang dapat diukur pada sistem PLTP Ulubelu dan parameter yang diubah untuk menghasilkan pengaruh laju massa uap terhadap efisiensi kinerja turbin dapat ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Parameter Pada Sistem PLTP Ulubelu

Kategori	Parameter	Satuan	Sumber Data	Keterangan
Parameter yang diukur (SCADA)	Laju aliran massa uap	kJ/kg	SCADA	Uap yang lebih tinggi menghasilkan kerja turbin yang lebih besar.
	Tekanan uap	Bar	SCADA	Tekanan uap yang lebih tinggi berarti uap memiliki energi potensial yang lebih besar.
	Temperatur uap	°C	SCADA	Peningkatan temperatur uap dapat meningkatkan efisiensi termal dan <i>output</i> daya turbin.
	Daya keluaran	MW	SCADA	Sebagai indikasi daya keluaran turbin
Parameter yang diubah	Entalpi	kJ/kg	<i>ChemicaLogic Steamtab</i>	Entalpi uap diukur pada titik masuk dan keluar turbin untuk menentukan perubahan energi yang terjadi.
	Entropi	J/K	<i>ChemicaLogic Steamtab</i>	Peningkatan entropi menunjukkan adanya kerugian irreversibilitas, yang mengurangi efisiensi turbin.
	Fraksi uap	%	Hasil perhitungan	Kandungan air yang tinggi dalam uap dapat menyebabkan erosi dan kerugian gesekan, yang mengurangi efisiensi turbin.
	Kinerja Turbin	kJ/kg	Hasil perhitungan	Kinerja turbin yang baik umumnya mengarah pada efisiensi yang tinggi.
	Efisiensi turbin	%	Hasil perhitungan	Dihitung berdasarkan persamaan efisiensi.

Adapun pengambilan data selama 7 hari yang ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Data Pengamatan

No	Tanggal	Waktu	Daya <i>Output</i> (MW)	Laju Uap Masuk (kg/s)	Laju Massa Uap (kg/s)	Tekanan Turbin (Bar)	Temperatur Uap Masuk (°C)
1.	30/10/2024	14.00					
		20.00					
		02.00					
2.	31/10/2024	14.00					
		20.00					
		02.00					
3.	03/11/2024	14.00					
		20.00					
		02.00					
4.	04/11/2024	14.00					
		20.00					
		02.00					
5.	05/11/2024	14.00					
		20.00					
		02.00					
6.	06/11/2024	14.00					
		20.00					
		02.00					
7.	07/11/2024	14.00					
		20.00					
		02.00					

Data yang diperoleh dianalisis dengan metode analisis statistik untuk mengetahui pengaruh laju massa uap terhadap efisiensi kerja turbin dan nilai efisiensi kerja turbin sehingga perlu dimasukkan ke dalam rumus. Adapun rumus yang digunakan adalah sebagai berikut.

1. Fraksi Uap

$$x = \frac{Sg_{in} - Sf_{out}}{S_{out} - Sf_{out}} \times 100\% \quad (3.1)$$

Keterangan :

x : Fraksi uap (%)

Sg_{in} : Entropi uap keluaran turbin (J/K)

Sf_{out} : Entropi uap keluar dalam keadaan saturasi cair (J/K)

S_{out} : Entropi uap jenuh (J/K)

2. Entalpi Uap Keluar Turbin

$$h_{2s} = hf + x (hfg) \quad (3.2)$$

Keterangan :

h_{2s} : Entalpi uap keluar turbin (kJ/kg)

hf : Entalpi uap dalam keadaan saturasi cair (kJ/kg)

x : Fraksi uap (%)

hfg : Entalpi perubahan dari air ke gas (kJ/kg)

3. Kerja Turbin Aktual

$$W = h_1 - h_{2s} \quad (3.3)$$

Keterangan :

W : Kerja turbin aktual (MW)

h_1 : Entalpi uap masuk turbin (kJ/kg)

h_{2s} : Entalpi uap keluar turbin (kJ/kg)

4. Daya Masuk Turbin

$$P_{in} = m \times W \quad (3.4)$$

Keterangan :

P_{in} : Daya masuk turbin (MW)
 m : Laju aliran massa uap (kg/s)
 W : Kerja turbin aktual (MW)

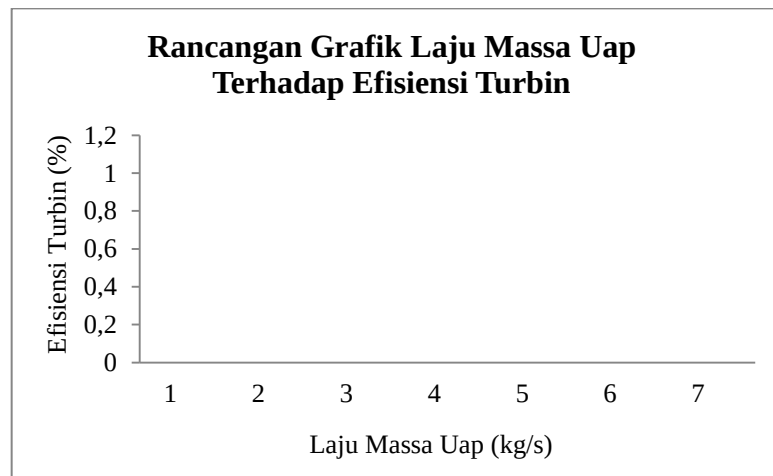
5. Efisiensi Turbin

$$\eta_{turbin} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3.5)$$

Keterangan :

η_{turbin} : Efisiensi Turbin (%)
 P_{out} : Daya keluar turbin (kW)
 P_{in} : Daya masuk turbin (kW)

Setelah mendapatkan hasil dari laju alir massa uap dan efisiensi kinerja turbin, maka dapat dicari perbandingan antara keduanya dengan menggunakan grafik pada Gambar 3.1.

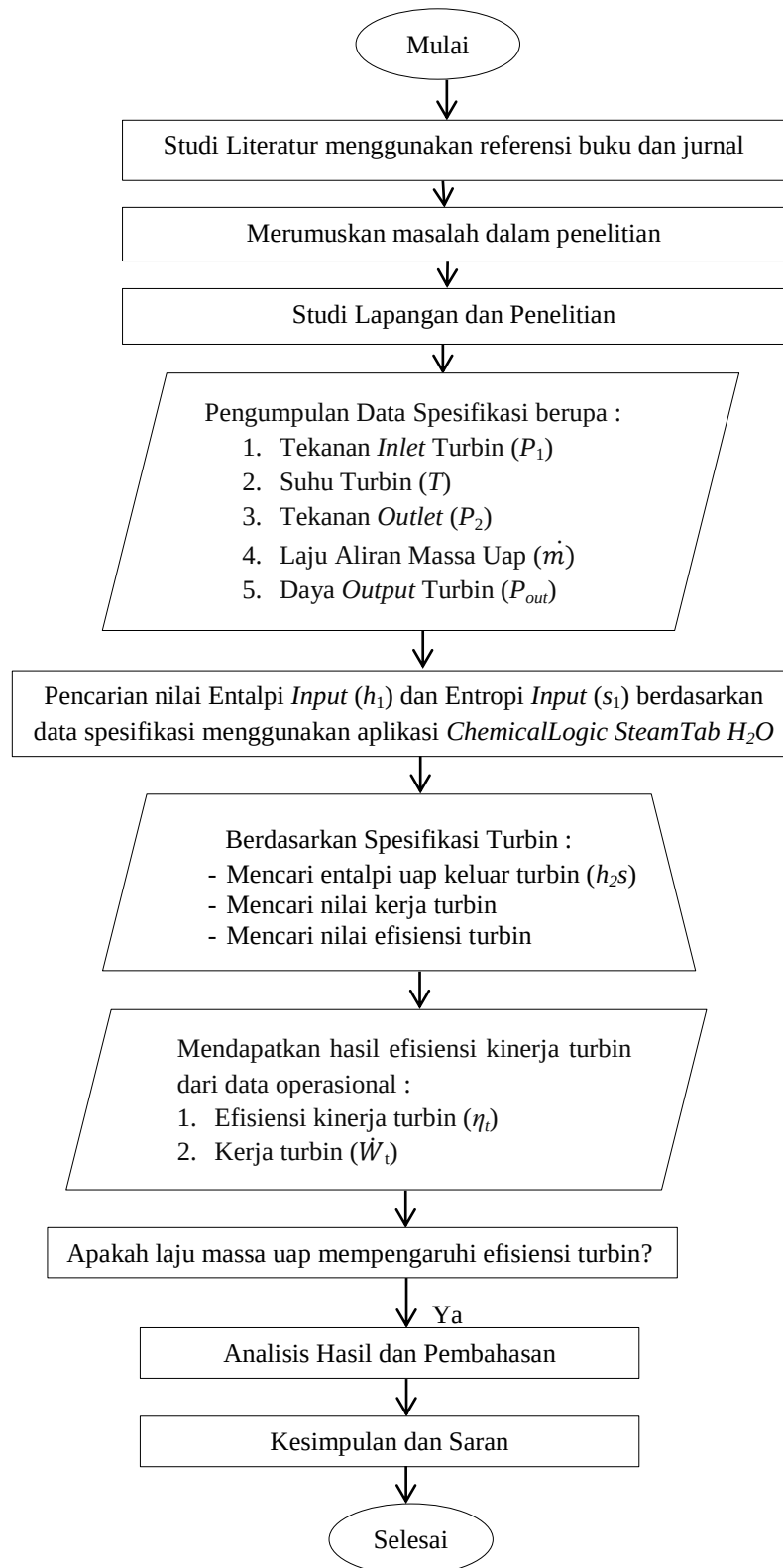


Gambar 3.1 Rancangan Grafik Efisiensi Turbin dengan Laju Massa Uap

Gambar 3.1 menunjukkan bahwa rancangan grafik yang menggambarkan hubungan antara laju massa uap dan efisiensi turbin. Sumbu vertikal (y) menunjukkan efisiensi turbin dalam persentase (%), sedangkan sumbu horizontal (x) menunjukkan laju aliran massa uap dalam kilogram per detik (kg/s), dengan waktu hari ke 1 sampai dengan 7. Secara keseluruhan, gambar ini adalah kerangka dasar untuk memvisualisasikan hubungan antara laju massa uap dan efisiensi turbin.

3.4 Diagram Alir

Diagram alir pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Faktor yang dapat mempengaruhi penurunan laju massa uap yaitu terdapat pada penurunan suhu dan kondisi kualitas uap. Suhu uap yang lebih rendah dari desain dapat mengurangi energi yang terkandung dalam uap, sehingga mengurangi laju aliran massa yang efektif. Sedangkan untuk kualitas uap yang buruk terjadi ketika uap basah atau uap yang mengandung kotoran, sehingga dapat mengurangi efisiensi turbin dan juga membatasi laju aliran massa. Jadi, kenaikan efisiensi turbin tidak hanya dilihat dari laju massa uap saja, tetapi dapat dipengaruhi oleh mesin turbin dan fraksi uap.
2. Hubungan antara laju massa uap dan efisiensi turbin tidak sepenuhnya linier. Ada fluktuasi yang menunjukkan bahwa faktor lain selain laju massa uap mungkin mempengaruhi efisiensi turbin. Perubahan dalam tekanan uap, suhu, dan kondisi operasi lainnya dapat berkontribusi pada fluktuasi ini. Tekanan dan suhu uap masuk serta tekanan uap keluar dapat memengaruhi hubungan antara laju massa uap dan efisiensi turbin.
3. Pengoperasian turbin uap sangat dipengaruhi oleh laju massa uap yang mengalir melaluinya, hal ini memiliki dampak langsung pada efisiensi turbin. Faktor-faktor seperti perubahan suhu atmosfer dan tekanan dapat mempengaruhi produksi uap, dan ini dapat bervariasi sepanjang hari. Cara mengoptimalkan pengoperasian kinerja turbin yaitu, operator PLTP mungkin menyesuaikan operasi turbin untuk mencapai efisiensi maksimal pada jam-jam tertentu, berdasarkan kondisi operasional dan permintaan beban, serta pemeliharaan dan pengaturan ulang dapat dilakukan pada siang hari, agar pada malam hari PLTP dapat beroperasi secara penuh.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil yang telah diperoleh, saran yang dapat diberikan dari penelitian ini yaitu, sebaiknya laju massa uap, tekanan uap, suhu, dan kondisi operasi lainnya tetap dijaga sesuai dengan beban kerja aktual agar perbandingan nilai kerja aktual turbin dan kerja isentropik turbin semakin kecil, sehingga diperoleh efisiensi turbin yang semakin besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, J. Jamaludin, M. Arif, & A. Amirudin. (2020). Analisa Pembangkit Tenaga Listrik Dengan Tenaga Uap di PLU. *ILTEK Jurnal Teknologi*. 15(4), 103-106.
- Amnur. (2022). Pengaruh Laju Aliran Volume Internal Dan Sudut Kemiringan Terhadap Efisiensi Turbin Screw 1 Sudu. *Jurnal Teknik Mesin*. 14(1), 13–19.
- Arrazi, M., Zamzami, & Maimun. (2023). Analisis Efisiensi Turbin Uap Sebagai Penggerak Generator Pabrik Minyak Kelapa Sawit PT. Syaukath Sejahtera (GANDAPURA). *Jurnal Tektro*. 7(1), 91–97.
- Atmanto. (2015). Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi dan Kendala Pembangunannya. *Orbith : Majalah Ilmiah Pengembangan Rekayasa Dan Sosial*. 11(1), 60–67.
- Azevedo, H. D. M., Araújo, A. M., & Bouchonneau, N. (2016). A review of wind turbine bearing condition monitoring: State of the art and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 5(6), 368–379.
- Chen, H., & Wang, L. (2019). Thermodynamic analysis and optimization of steam turbine cycles for various operating loads. *Energy Conversion and Management*. 19(6), 141-152.
- Damayanti. (2022). Analisis Kinerja Turbin Uap Sebelum dan Setelah Proses Overhaul di PT Pertamina Geothermal Energi Area Kamojang. *Ilmiah Teknik Kimia*. 6(2), 22-25.
- Dharma, D., & Bachtiar, A. (2013). Studi Eksperimen Perbandingan Pengaruh Variasi Tekanan Inlet Turbin dan Variasi Pembebanan Terhadap Karakteristik. *Jurnal Teknik Pomits*. 2(3), 415-418.
- Dinda, A., Y. (2024). Studi Analisis Efisiensi Steam Turbine Generator Pada Bagian Asam Sulfat Dan Utilitas Departemen Produksi Iiib Pt Petrokimia Gresik. *Jurnal Teknologi Separasi*. 10(1), 33–40.

- E. Yohana, B. Farizki, N. Sinaga, M. E. Julianto & I. Hartati. (2019). Analisis Pengaruh Temperatur dan Laju Aliran Massa Cooling Tower Terhadap Efektivitas Kondensor di PT. Geo Dipa Eenrgi Unit Dieng. *Rotasi*. 2(1), 156-159.
- Harefa, J. C. (2023). Tinjauan Singkat Sistem PLTP Siklus Gabungan Sarulla Menggunakan Ormat Energy Converter. *Jurnal Mineral, Energi, Dan Lingkungan*. 6(2), 179-185.
- Jakariya, J., Setiawan, D., & Mulyadi, A. D. (2023). Pengaruh Respon Governor Elektronik pada Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi dengan Memperhatikan Kendala Operasi. *Jurnal Ilmiah Energi Dan Kelistrikan*. 15(1), 1–12.
- Kusuma, G. A., Mangindaan, G., & Pakiding, M. (2018). Analisa Efisiensi Thermal Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Lahendong Unit 5 dan 6 Di Tompaso. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer*. 7(2), 123–134.
- Linda., Arman, Y. & M.B. (2016). Aplikasi Interpolasi Lagrange untuk Menentukan Efisiensi Turbin PLRU. *Prisma Fisika*. 4(1). 41-44.
- Lee, H. J., Kim, S. H., & Jeung, I. S. (2011). Experimental investigation on the self-ignition of pressurized hydrogen released by the failure of a rupture disk through tubes. *Proceedings of the Combustion Institute*, 33(2), 2351–2358.
- Mandyvo, P. (2020). Analisa Performa Pembangkit Listrik Akibat Konsumsi Rumah Tangga di PKS PTPN IV Kebun Adolina. *PISTON. Jurnal Teknik Mesin*. 4(2), 57-63.
- Muharrir, M., & Hajar, I. (2019). Analisis Pengaruh Beban Terhadap Efisiensi Generator Unit 2 PLTP PT Indonesia Power UPJP Kamojang. *Kilat*. 8(2). 57-60.
- Paish. (2002). Small hydro power: technology and current Status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 6(5), 537–556.
- Pambudi, N. A., Itoi, R., Jalilinasrabady, S., & Jaelani, K. (2015). Performance improvement of a single-flash geothermal power plant in Dieng, Indonesia, upon conversion to a double-flash system using thermodynamic analysis. *Renewable Energy*. 80, 424–431.

- Pasek, A. D., Fauzi Soelaiman, T. A., & Gunawan, C. (2011). Thermodynamics study of flash-binary cycle in geothermal power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15(9), 5218–5223.
- Poernomo Sari, S., dan Fasha, R. (2012). Pengaruh Ukuran Diameter Nosel 7 Dan 9 mm Terhadap Putaran Sudu Dan Daya Listrik Pada Turbin Pleton. *Jurnal Teknik Mesin*. 8(11), 79-85.
- Prananto, L. A., Juangsa, F. B., Iqbal, R. M., Aziz, M., & Soelaiman, T. A. F. (2018). Dry steam cycle application for excess steam utilization: Kamojang geothermal power plant case study. *Renewable Energy*. 117, 157–165.
- Romadhon. (2017). Analisa Efisiensi Isentropik dan Exergy Destruction Pada Turbin Uap Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap. *Rotasi*. 19(3), 134. 134-138.
- R. Samosir. (2019). Analisa Efisiensi Isentropik Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBM)," *Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin*. 1(2). 29-33.
- R. T. Mary, A. Armawi, A. H. Hadna and A. J. Pitoyo. (2017). Panas Bumi Sebagai Harta Karun Untuk Menuju Ketahanan Energi. *Jurnal Ketahanan Energi*. 2(3), 218-220.
- Septianto, M.R., Subekti, M., & Daryanto. (2017). Rancang Bangun Turbin Uap Pada Maket Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *Journal of Electrical and Vocational Education and Technology*. 2(4), 37-40.
- Setya, R. F., & Suparman, S. 2020. Energy and Exergy Analysis of Dieng Geothermal Power Plant. *International Journal of Technology*. 11(5), 903-912.
- Shlyakhin. (1993). *Turbin Uap*. Erlangga. Jakarta.
- Sidiq, A. N., & Anwar, M. (2021). Perbandingan Efisiensi Turbin Uap Kondisi Aktual Berbasis Data Komissioning Sesuai Standard ASME PTC 6. *Kilat*. 10(1), 190–199.
- Sihombing, C. (2020). Analisa Efisiensi Termal Turbin, Kondensor dan Menara Pendingin pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi. *Majalah Ilmiah Swara Patra*. 10(1), 05–12.

- Silanegara. (2019). Analisis Pengaruh Temperatur Air Pendingin Terhadap Kinerja dan Efisiensi Turbin Uap di PLTP Unit 1 DIENG. *Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*. 7(4), 249-755.
- Susanto, H. & Wijayanto, D. (2021). Analisis Kinerja Termal PLTU dengan Variasi Beban Operasi. *Jurnal Teknik Mesin*. 10(2), 88-96.
- Ungemach, P. (2003). Reinjection of cooled geothermal brines into sandstone reservoirs. *Journal of Power and Energy Systems*. 3(2), 743–761.
- Wahidah, N., Ihsan Zelviani, S., Narti, & Abadi, F.A. (2019). Pengaruh Jenis Fluida Terhadap Unjuk Kerja Miniatur Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. 2(6), 37-40.
- Wulandari, S., & Basri, H. (2022). Analisa Energi dan Eksergi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *Buletin Poltanesa*, 23(1), 254–265.
- Yuniarti, E. (2012). Rancangan Parameter Turbin Crossflow Generator Sikron Pada Pltmh Talang Lintang. *Berkala Teknik*. 2(4), 1–8.
- Zidonis, A., and George, A. (2015). State Of The Art In Numerical Modelling Of Pelton Turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 4(5),135–144.