ANALISIS PENGARUH VARIASI BEBAN GENERATOR TERHADAP EFISIENSI OUTPUT LISTRIK TURBIN UAP

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Elektro Pada Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Disusun Oleh:

RAGIL REAN WIJAYA

2107220071

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN

2025

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama	: Ragil Rean Wijaya
NPM	: 2107220071
Program Studi	: Teknik Elektro
Judul Skripsi	: Analisis Pengaruh Variasi Beban Generator Terhadap Efisiensi Output Listrik Turbin Uap
Bidang ilmu	: Sistem Tenaga

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan,22 September 2025

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing I / Penguji

Dr. Elvy Sahnur Nst., ST., M.Pd.

Dosen Pembanding I / Penguji

Faisal Irsan Pasaribu, S.T, S.Pd., M.T

Dosen Pembanding II / Peguji

Dr. Sudirman Lubis, ST., M.T.

Program Studi Teknik Elektro

Ketua,

Dr. Elvy Sahnur Nst., ST., M.Pd.

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap	: Ragil Rean Wijaya
Tempat /Tanggal Lahir	: Medan/10 Juni 2002
NPM	: 2107220071
Fakultas	: Teknik
Program Studi	: Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

"Analisis Pengaruh Variasi Beban Generator Terhadap Efisiensi Output Listrik Turbin Uap",

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/ kesarjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan,22 September 2025
Saya yang menyatakan,

Ragil Rean Wijaya

ABSTRAK

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat menuntut sistem pembangkitan yang mampu bekerja dengan andal dan efisien. Pabrik kelapa sawit sebagai salah satu pengguna turbin uap dituntut mengoptimalkan kinerja generator agar rugi-rugi daya dapat ditekan. Variasi beban generator diketahui berpengaruh terhadap stabilitas tegangan serta efisiensi konversi energi uap menjadi energi listrik. Oleh karena itu, diperlukan analisis lebih lanjut mengenai hubungan variasi beban dengan efisiensi keluaran listrik.Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi beban generator terhadap output listrik turbin uap serta mengidentifikasi kondisi beban yang menghasilkan efisiensi optimal. Metode penelitian dilakukan secara kuantitatif dengan pengumpulan data lapangan di PTPN IV Unit PKS Berangir selama enam hari berturut-turut (23–28 Juli 2025). Data yang dicatat mencakup daya masukan turbin (Pin) berdasarkan perhitungan laju massa uap dan entalpi, serta daya keluaran generator (Pout) dari pengukuran sistem tiga fasa. Efisiensi dihitung melalui perbandingan Pout dengan Pin.Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi beban generator berpengaruh signifikan terhadap efisiensi sistem. Nilai efisiensi berfluktuasi pada rentang 84,16% hingga 98,09%. Efisiensi tertinggi dicapai pada beban menengah (98,09%), sedangkan efisiensi terendah terjadi pada beban tinggi (84,16%). Selisih antara daya masukan dan keluaran menunjukkan rugi-rugi energi berkisar 10,4–95,8 kW, yang bersumber dari faktor mekanis, panas, dan kelistrikan. Kesimpulannya, beban menengah menjadi kondisi paling optimal dalam menjaga efisiensi tinggi dan meminimalkan rugi-rugi daya pada turbin uap.

Kata kunci: Turbin Uap, Variasi Beban Generator, Efisiensi Pembangkitan Listrik, Rugi-Rugi Daya.

ABSTRACT

The increasing demand for electrical energy requires power generation systems that operate reliably and efficiently. Palm oil mills, as one of the industries utilizing steam turbines, must optimize generator performance in order to minimize power losses. Variations in generator load are known to affect voltage stability as well as the efficiency of converting steam energy into electrical energy. Therefore, further analysis is needed to examine the relationship between load variations and electrical output efficiency.This study aims to analyze the effect of generator load variations on the electrical output of a steam turbine and to identify load conditions that produce optimal efficiency. The research applied a quantitative method through field data collection at PTPN IV Unit PKS Berangir over six consecutive days (July 23–28, 2025). The recorded data included turbine input power (Pin), calculated from steam mass flow and enthalpy difference, and generator output power (Pout), measured using a three-phase system. Efficiency was determined by comparing Pout with Pin.The results indicate that generator load variations significantly affect system efficiency. Efficiency values fluctuated between 84.16% and 98.09%. The highest efficiency was achieved at medium load (98.09%), while the lowest occurred at high load (84.16%). The difference between input and output power showed energy losses ranging from 10.4 to 95.8 kW, originating from mechanical, thermal, and electrical factors. In conclusion, medium load conditions are most optimal for maintaining high efficiency and minimizing power losses in steam turbine operations.

Keywords: *Steam Turbine, Generator Load Variation, Power Generation Efficiency, Power Losses.*

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul "Analisis Pengaruh Variasi Beban Generator terhadap Efisiensi Output Listrik Turbin Uap" ini dengan baik dan tepat waktu. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Penulis menyadari bahwa tersusunnya skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Orang Tua Tercinta yang telah melahirkan, membesarkan, mendoakan dan senantiasa mendukung penulis dalam segala aspek, Ayahanda Andi Wijaya dan Ibunda Arleni.
2. Ibu Dr. Elvy Sahnur Nst., ST., M.Pd. sebagai dosen pembimbing yang dalam pembuatan skripsi ini memberikan bantuan, dukungan serta arahan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak Faisal Irsan Pasaribu, ST., MT. dan Bapak Dr. Sudirman Lubis, ST., M.T. selaku dosen penguji yang dalam pembuatan skripsi memberikan masukan serta arahan sehingga penulis dapat menyusun skripsi ini dengan baik.
4. Ibu Dr. Elvy Sahnur Nst., ST., M.Pd. sebagai Ketua Program Studi Fakultas Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. Seluruh dosen program studi teknik elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah mengajarkan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis dari semester pertama hingga sampai saat ini.
5. Sahabat penulis Farhan Afidal, Iwan Prayogo,Yogi Pangestu, Reski Abadi, Rizki Wahyu Ramdana M, Syahrul Ramadan, dan Yamin Azhari yang telah membantu dalam pembuatan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi

perbaikan di masa mendatang. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan pihak-pihak yang berkepentingan dalam bidang pembangkitan tenaga listrik, khususnya yang berkaitan dengan efisiensi sistem turbin uap.

Medan, September 2025

Ragil Rean Wijaya

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN ..... **i**
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR ..... **ii**
ABSTRAK ..... **iii**
ABSTRACT ..... **iv**
KATA PENGANTAR ..... **v**
DAFTAR ISI ..... **vii**
DAFTAR GAMBAR ..... **ix**
DAFTAR TABEL ..... **xi**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Ruang Lingkup 2
1.4 Tujuan Penelitian 2
1.5 Mamfaat Penelitian 2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA **4**
2.1 Tinjauan Pustaka Relavan 4
2.2 Landasan Teori 8
2.2.1 Turbin Uap 8
2.2.2 Jenis-Jenis Turbin Uap 8
2.2.2.1. Berdasarkan Prinsip Konversi Energi 9
2.2.2.2. Berdasarkan Tekanan Uap Keluar 10
2.2.2.3. Berdasarkan Arah Aliran Uap 11
2.2.2.4 Berdasarkan Jumlah Tingkat Ekspansi 12
2.2.3 Prinsip Kerja Turbin Uap 13
2.2.4 Parameter Operasi Turbin Uap 14
2.2.5 Komponen Turbin Uap 16
2.2.6 Keunggulan dan Karakteristik Turbin Uap 23
2.2.7 Generator Tiga Phasa 24
2.2.8 Jenis-Jenis Generator Tiga Fasa 24
2.2.8.1. Berdasarkan Jenis Medan Magnet 24
2.2.8.2. Berdasarkan Cara Eksitasi 25

2.2.8.3. Berdasarkan Metode Pendinginan 26
2.2.9 Prinsip Kerja Generator Tiga Phasa 27
2.2.10 Komponen Generator SinkronTiga Fasa 28
2.2.11 Efesiensi Generator 32
2.2.12 Termodinamika pada Sistem Turbin Uap..... 34
2.2.13 Laju Alir Massa Uap 36
2.2.14 Daya Isentropis 38
2.2.15 Entalpi dan Entropi pada Sistem Termodinamika Turbin Uap 39
2.2.16 Rugi-Rugi Energi pada Turbin Uap 41
BAB III METODEOLOGI 43
3.1 Waktu Dan Tempat Penelitian..... 43
3.2 Alat Dan Bahan 43
3.2.1 Alat 43
3.2.2 Bahan..... 49
3.3 Prosedur Penelitan 49
3.4 Metode Penelitian..... 49
3.5 Bagan Alir Penelitian 50
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 51
4.1 Gambaran Umum Lokasi Penelitian 51
4.2 Data Hasil Penelitian 51
4.3 Perhitungan Daya Masuk Dan Daya keluar Turbin 52
4.4 Perhitungan Efisiensi Beban Generator..... 60
4.5 Analisis Perbandingan Hasil Variasi Beban Selama 6 Hari Terhadap Daya Input Dengan Daya Output..... 65
BAB V PENUTUP 67
5.1 Kesimpulan..... 67
5.2 Saran 68
DAFTAR PUSTAKA 69
LAMPIRAN 72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.Impulse Turbine 9
Gambar 2.2. Reaction Turbine 10
Gambar 2.3.Turbin Back Pressure 11
Gambar 2.4.Turbin Aliran Axial 11
Gambar 2.5.Turbin Satu Tingkat 12
Gambar 2.6.Turbin Multi-Tingkat 13
Gambar 2.7.Komponen Turbin Uap 16
Gambar 2.8.Rotor wheel Turbine Uap 17
Gambar 2.9.Guide Ring Turbin Uap 17
Gambar 2.10.Moving Blades Turbin uap 18
Gambar 2.11.Casing Turbin Uap 18
Gambar 2.12.Noozle Turbin Uap 19
Gambar 2.13.Shaft Turbin Uap 19
Gambar 2.14.Labirin Seal dan Gland Seal Turbine 20
Gambar 2.15. Sistem Pelumasan Pada Bearing dan Shaft Turbine Uap 21
Gambar 2.16.Journal Bearing Turbin Uap 21
Gambar 2.17.Thurst Bearing Turbin Uap 22
Gambar 2.18.Generator Tiga Phasa 24
Gambar 2.19.Exciter Field Stator 28
Gambar 2.20.Exciter Field Rotor 29
Gambar 2.21.Diode Rotating Rectifier 29
Gambar 2.22.Slip Ring & Brush 30
Gambar 2.23.Housing Generator 31
Gambar 2.24.Automatic Voltage Regulator - AVR 31
Gambar 2.25.Panel Kontrol 32
Gambar 3.1. Control Panel Turbin Uap 44
Gambar 3.2.Turbin Uap 44
Gambar 3.3.Generator 45
Gambar 3.4.Pressure Gauge 46
Gambar 3.5.Temperatur Gauge 46
Gambar 3.6.Boiler 47

Gambar 3.7.Kontrol Panel Boiler.....47
Gambar 3.8.Laptop.....48
Gambar 3.9.Kalkulator 48

DAFTAR TABEL

Tabel.2.1. Standar Batas Suhu Pada Bearing Turbin Uap Pada PT.Adibrata Unggul Jaya 22
Table 3.1.Waktu Dan Tempat Penelitian 43
Tabel 3.1.Nameplate Turbine Shinko..... 44
Tabel 3.2.Spesifikasi Generator Standford..... 45
Tabel 3.3 Nameplate Boiler..... 47
Tabel 4.1 Hasil Analisis Penelitian 52
Tabel 4.2.Hasil Perhitungan Analisa P input dan P output Generator 58
Tabel 4.3 Spesifikasi Generator yang digunakan PTPN IV Berangir 60
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Efisiensi Generator 63
Tabel 4.5 Hasil Perbadingan Pin dan Pout 63

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi yang semakin berkembang membuat kebutuhan akan energi menjadi pemegang peranan penting pada perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Hampir seluruh kegiatan dalam kehidupan manusia memerlukan energi untuk membantu melakukan banyak proses dan kegiatan sebagai pengganti tenaga manusia. Energi yang paling dibutuhkan manusia salah satunya adalah energi listrik.(Sahid, Agus H., 2014) Listrik merupakan sesuatu yang sangat dibutuhkan, karena itu perlu adanya pembangkit untuk mengkonversi energi mekanis menjadi energi listrik, salah satunya adalah turbin uap (Nurotusholihah & Ramdani, 2017)

Turbin uap merupakan salah satu komponen utama pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi sebagai penggerak mula yang digunakan untuk mengubah energi panas uap menjadi energi mekanis (putaran poros turbin).(Sagita Firza Nur & I Gede Eka Lesmana, 2021)

Generator merupakan suatu peralatan utama dalam suatu sistem pembangkit energi listrik. Generator akan mengubah energi mekanis dari turbin menjadi energi listrik. Generator dikatakan sinkron jika memiliki kecepatan putar rotor yang sama dengan kecepatan putar medan magnet pada stator. Pada dasarnya konstruksi generator sinkron sama dengan konstruksi motor sinkron sehingga bisa juga disebut sebagai mesin sinkron. Dalam penggunaanya, generator beroperasi secara terus-menerus sesuai dengan kebutuhan beban yang dilayani. Apabila dihubungkan dengan banyak beban listrik, maka itu akan memperberat kerja generator dan bisa mengakibatkan trip yang akan mengakibatkan proses pembangkitan listrik berhenti mendadak. Supaya proses tidak berhenti mendadak, operator akan mengurangi beban listrik. Perubahan beban yang terjadi pada generator.(Azis H et al., 2024)

Generator memainkan peran penting dalam menyediakan energi listrik di sistem tenaga. Beban pada generator yang berubah-ubah dalam sistem interkoneksi dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan. Tegangan generator dapat diatur melalui arus eksitasi, yaitu pasokan listrik DC yang menguatkan medan pada generator untuk menghasilkan energi listrik dengan tegangan keluaran yang bergantung pada arus eksitasi.(P. Indonesia et al., 2025)

1.2 Rumusan Masalah

Adapun Rumusan Masalah pada Penelitian Tugas Akhir adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana variasi beban generator dengan output listrik turbin uap.
2. Bagaimana efisiensi pembangkitan listrik saat terjadi perubahan beban.

1.3 Ruang Lingkup

Agar Penelitian tugas akhir ini terarah,dan tanpa mengurangi maksud juga tujuannya,maka ditetapkan ruang lingkup penelitian sebagai berikut:

1. Penelitian ini dibatasi pada sistem pembangkit listrik berbasis turbin uap di Pabrik Kelapa Sawit.
2. Fokus pengamatan pada parameter beban generator dan efisiensi daya output listrik.
3. Data yang dianalisis berupa daya input,daya output,efisiensi dan variasi beban.
4. Tidak membahas faktor non-teknis seperti biaya atau aspek lingkungan secara mendalam.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari peneltian ini adalah :

1. Menganalisis variasi beban generator dengan output listrik turbin uap.
2. Mengidentifikasi bagaimana efisiensi pembangkitan listrik saat terjadi perubahan beban.

1.5 Mamfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menambah wawasan mengenai pengaruh variasi beban terhadap efisiensi pembangkitan listrik dan dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

2. Memberikan rekomendasi bagi operator pembangkit listrik dalam mengoptimalkan beban generator guna meningkatkan efisiensi operasional.
3. Membantu meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pembangkitan listrik berbasis turbin uap, sehingga dapat mengurangi rugi-rugi daya dan meningkatkan efektivitas operasional.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka Relavan

Penelitian yang berjudul “Analisa Pengaruh Perubahan Beban terhadap Efisiensi Generator Sinkron 3 Fasa di PLTP Lahendong Unit 3”. penelitian ini bertujuan untuk analisa terhadap efisiensi generator apakah generator masih dalam keadaan optimal atau kurang optimal. Hasil dari analisa dengan mengambil data pada tanggal 1 bulan Mei 2021 selama 1 bulan didapatkan hasil perhitungan yang kemudian dianalisis bahwa nilai beban yang paling rendah yang dihasilkan generator adalah 12 MW dengan efisiensi generator 56% dan nilai beban yang paling tinggi adalah 19 MW dengan efisiensi 88%. %. Hal ini menunjukkan bawah nilai beban yang dihasilkan generator berpengaruh terhadap efisiensi generator.(Manangka et al., 2022)

Penelitian yang berjudul “Analisis Pengaruh Perubahan Beban Generator Terhadap Efsiensi Kinerja PLTU Bosowa Energi Jeneponto Unit 2”. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan beban generator terhadap efisiensi kinerja pada pembangkit listrik tenaga uap dan mengetahui jumlah daya masukan pada boiler. Hasil penelitian ini yaitu efisiensi tertinggi terdapat pada tanggal 20 Mei 2018 pada pukul 18.00 dengan beban 90,00 MW yaitu 55,68% dan efisiensi terendah terdapat pada tanggal 12 Mei 2018 pada pukul 03.00 dengan beban 64,98 MW yaitu 22,69 %. Daya input boiler tertinggi berdasarkan hasil analisa terdapat pada tanggal 3 Mei 2018 pada pukul 20.00 yaitu 356,61 MW, serta daya input boiler terendah berdasarkan hasil analisa terdapat pada tanggal 15 Mei 2018 pada pukul 07.00 yaitu 128,14 MW.(Pangkung et al., 2021)

Penelitian yang berjudul “Pengaruh Beban Gas Turbine Generator terhadap Efisiensi Heat Recovery Steam Generator pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU)”Penelitian ini bertujuan untuk membahas pengaruh beban terhadap efisiensi HRSG. Pengamatan dilakukan selama 24 jam selama beberapa hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi rata-rata HRSG selama periode tersebut adalah 65% dengan beban rata-rata 28184 kW. Efisiensi tertinggi HRSG dicapai pada saat beban 25957 kW yaitu 75.14%. sedangkan efisiensi terendah saat beban 30127 kW yaitu 56.77%. Koefisien korelasi diperoleh sebesar –0.7 yang berarti

pengaruh beban terhadap efisiensi kuat dan berbanding terbalik. Nilai R Square menunjukkan pengaruh pembebanan terhadap efisiensi HRSG yaitu 48.23 %.(SUGANDI et al., 2023).

Penelitian yang berjudul “Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Karakteristik Generator Sinkron” penelitian ini dilakukan sebuah perhitungan dan analisis pengaruh perubahan beban terhadap karakteristik generator sinkron unit & 2 di PT Sumber Segara Primadaya. Berdasarkan hasil dari data di lapangan diperoleh efisiensi generator unit 1 & 2 berada pada rentang 97,12 % sampai dengan 98,73%, angka ini cukup baik mengingat rugi yang dihasilkan maksimal hanya sebesar 2,88 %.(Annisa et al.,2019).

Penelitian yang berjudul” Pengaruh Perubahan Beban Generator Terhadap Efisiensi Pltu (Studi Pada Pltu Semen Tonasa Unit 35 Mw)” h penelitian deskriptif yang bertujuan untuk mengetahui efisiensi sebelum dan setelah beban generator berubah. Serta untuk mengetahui pengaruh perubahan beban terhadap efisiensi generator. Objek pada penelitian ini adalah generator pada PLTU Semen Tonasa. hasil penelitian disimpulkan efisiensi sebelum beban generator berubah yaitu 97,4% sedangkan efisiensi setelah beban generator berubah yaitu 84,68%, dan perubahan beban pada generator dapat mempengaruhi efisiensi generator dimana beban dan nilai efisiensi berbanding terbalik(Nur et al., 2022)

Penelitian yang berjudul ”Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Generator” Penurunan efisiensi generator merupakan salah satu penyebab terjadinya rugi-rugi pada generator yang mengakibatkan arus listrik tidak optimal. Jadi itu harus dilakukan analisis efisiensi generator, apakah generator tersebut masih dalam kondisi optimal atau tidak optimal. Dari hasil analisis tersebut, dengan menggunakan data bulan desember 2022 diperoleh hasil perhitungan yang kemudian dianalisis dan didapatkan nilai beban terendah yang dihasilkan oleh pembangkit sebesar 15MW dengan efisiensi sebesar 57,68%, dan nilai beban terbesar sebesar 20MW dengan efisiensi sebesar 98,79%. Hal ini dapat diketahui bahwa nilai beban yang diperoleh generator mempengaruhi efisiensi dari generator. Dari hasil diatas bisa disarankan kepada perusahaan terkait penindakan lebih lanjut terhadap kinerja generator.(Apouw & Mangindaan, 2023)

Penelitian yang berjudul ”Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efesiensi Generator Kapasitas 12 Mw Dengan Metode Trial And Error Di Pt Permata Hijau Palm Oleo Belawan” penelitian ini dilakukan sebuah perhitungan dan analisis pengaruh perubahan beban terhadap efisiensi generator di PT Permata Hijau Palm Oleo Belawan. Berdasarkan hasil dari data di lapangan diperoleh efisiensi generator 89,14% sampai dengan 96,26%, angka ini cukup baik mengingat rugi yang dihasilkan maksimal hanya sebesar 10,45%(Azis H et al., 2024)

Penelitian yang berjudul “ANALISA HEAT RATE DENGAN VARIASI BEBAN PADA PLTU PAITON BARU (UNIT 9)” Penelitian dari data tersebut dilakukan pengolahan data untuk menentukan nilai heat rate dengan variasi beban sehingga didapatkan konsumsi batubara spesifik dan biaya produksi listrik. hasil pengolahan data maka didapatkan grafik hubuganheat rate terhadap beban yang bervariasi, konsumsi batubara spesifik, dan biaya produksi listrik. Dari hasil perhitungan yang dilakukan diperoleh hasil heat rate terendah yaitu 2416,22 kcal/kWh pada beban 659 MW dengan nilai konsumsi batubara spesifik adalah 0,572 kg/kWh dan biaya produksi listrik 400,32 Rp/kWh. Sehingga dapat dikatakan bahwa semakin kecil nilai heat rate maka semakin rendah konsumsi batubara spesifik dan semakin kecil biaya produksi listrik.(Sahid, Agus H., 2014)

Penelitian yang berjudul “Pengaruh Variasi Beban Terhadap Efisiensi High Pressure System Heat Recovery Steam Generator 2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Gas Dan Uap Tambak Lorok Pt. Indonesia Power Semarang Pgu” Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi beban terhadap nilai efisiensi High Pressure System Heat Recovery Steam Generator (HP HRSG) 2.3 dilakukan pada tanggal 18 Agustus 2019. Besar efisiensi dapat digunakan sebagai acuan pengoperasian HRSG guna meningkatkan produksi listrik. Hasil analisa perhitungan data operasional maka diperoleh nilai efisiensi pada saat beban 90 MW sebesar 52,07%, saat beban 80 MW sebesar 49,59%, dan saat beban 70 MW sebesar 48,19%. Data menunjukkan efisiensi HP HRSG semakin tinggi saat beban pada gas turbine generator (GTG) bertambah besar hal tersebut dikarenakan panas gas buang yang dihasilkan besar saat beban GTG besar pula.(P. T. Indonesia & Semarang, 2020)

Penelitian yang berjudul “Pengaruh Perubahan Beban Generator Sinkron Terhadap Sistem Eksitasi Studi Kasus Pt. Pln Indonesia Power Upk Plta Maninjau” Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis pengaruh perubahan beban generator sinkron terhadap sistem eksitasi pada generator dan pengaruh arus eksitasi terhadap tegangan generator unit 2 PLTA Maninjau. Jenis sistem eksitasi pada PLTA Maninjau adalah sistem eksitasi dengan PMG, tegangan keluaran generator unit 2 PLTA Maninjau adalah 10 kV. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melihat data yang terbaca pada data beban generator dan arus eksitasi yang dibaca pada parameter DCS. Selanjutnya, dari data yang didapatkan, nilai tegangan generator berada pada rentang 10,3 kV – 10,6 kV. Hal ini menunjukkan bahwa komponen AVR bekerja dengan baik dalam membaca dan memberikan perintah dalam mengatur tegangan keluaran generator. Dari data yang didapat, nilai perubahan beban pada generator mempengaruhi nilai arus eksitasi yang diinjeksikan. Beban terendah berada pada 10,4 MW dengan nilai arus eksitasi yang diinjeksikan sebesar 8 A dan tegangan generator berada pada 10,6 kV, sementara beban terbesar berada pada nilai 16,5 MW dengan nilai arus eksitasi yang lebih tinggi.(P. Indonesia et al., 2025)

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Turbin Uap

Turbin uap adalah pesawat dengan aliran tetap (steady-flow) machine. Turbin uap mendapat energi uap yang bertemperatur dan bertekanan tinggi yang berekspansi melalui sudu-sudu turbin, dimana uap melalui nozzel di ekspansikan ke sudu-sudu turbin dengan penurunan tekanan yang drastis sehingga terjadi perubahan energi kinetik pada uap. Energi kinetik uap yang keluar dari nozzel diberikan pada sudu-sudu turbin. Akibatnya, poros turbin berputar dan menghasilkan tenaga.(Pangkung et al., 2021)

Berbeda dengan mesin torak yang memiliki komponen bergerak secara translasi, turbin uap hanya memiliki bagian yang berputar. Komponen yang berotasi disebut rotor (roda turbin), sementara bagian yang diam disebut stator (rumah turbin). Roda turbin ini berada di dalam rumah turbin dan berperan dalam memutar poros daya yang menggerakkan generator listrik.

Di dalam turbin, uap mengalami proses ekspansi, yaitu penurunan tekanan yang memungkinkan uap mengalir secara kontinu. Dalam perancangannya, turbin uap dirancang sebagai sistem tenaga yang diharapkan memiliki biaya operasional yang rendah serta konstruksi yang sederhana, sehingga lebih mudah dalam perakitan dan pemeliharaan. Namun, turbin uap dengan efisiensi tinggi memerlukan desain dan konstruksi yang lebih kompleks, penggunaan material dalam jumlah lebih banyak, serta proses perakitan, perbaikan, dan pemeliharaan yang lebih sulit dan berbiaya tinggi.

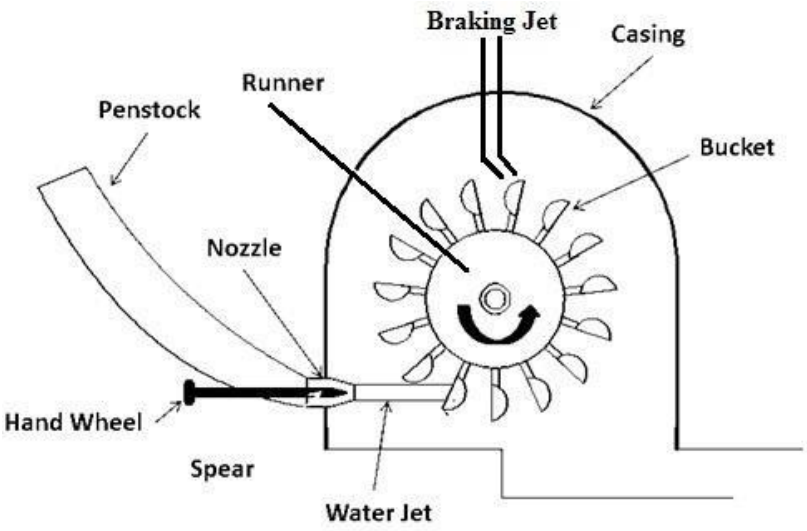
2.2.2 Jenis-Jenis Turbin Uap

Turbin uap dapat diklasifikasikan berdasarkan prinsip kerja, tekanan uap keluar, arah aliran uap, serta jumlah tingkat ekspansi. Pemilihan jenis turbin yang tepat sangat bergantung pada kebutuhan industri dan efisiensi sistem. Dalam konteks penelitian ini, pemahaman tentang jenis-jenis turbin uap menjadi penting untuk menganalisis pengaruh putaran (*RPM*) terhadap optimasi beban listrik. Berikut adalah jenis-jenis turbin uap yang perlu diperhatikan:

2.2.2.1. Berdasarkan Prinsip Konversi Energi

a.Turbin Aksi *(Impulse Turbine)*

Turbin aksi bekerja dengan memanfaatkan perubahan kecepatan uap sebagai sumber energi utama untuk menggerakkan sudu-sudu turbin. Uap bertekanan tinggi diarahkan melalui nosel sehingga kecepatannya meningkat, sementara tekanannya turun secara drastis. Uap dengan energi kinetik tinggi ini kemudian menghantam sudu gerak, menyebabkan rotor berputar. Karena hanya terjadi perubahan kecepatan tanpa perubahan tekanan di dalam sudu gerak, jenis turbin ini cenderung lebih sederhana dalam desainnya.

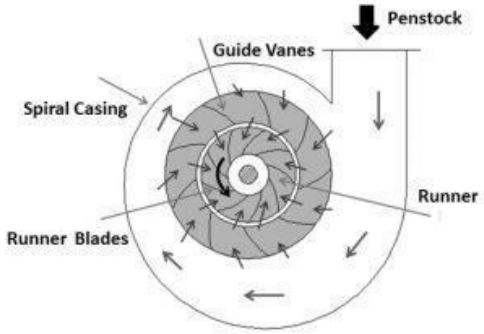


Gambar 2.1.Impulse Turbine

b.Turbin Reaksi *(Reaction Turbine)*

Berbeda dengan turbin aksi, turbin reaksi memanfaatkan perbedaan tekanan yang terjadi pada sudu tetap dan sudu gerak. Uap mengalami ekspansi secara bertahap saat melewati sudu-sudu turbin, menghasilkan gaya dorong yang menggerakkan rotor. Sistem ini memungkinkan konversi energi secara lebih efisien

dalam beberapa tahap, sehingga cocok untuk aplikasi dengan kebutuhan daya tinggi dan penggunaan energi yang lebih optimal.



Gambar 2.2. Reaction Turbine

2.2.2.2. Berdasarkan Tekanan Uap Keluar

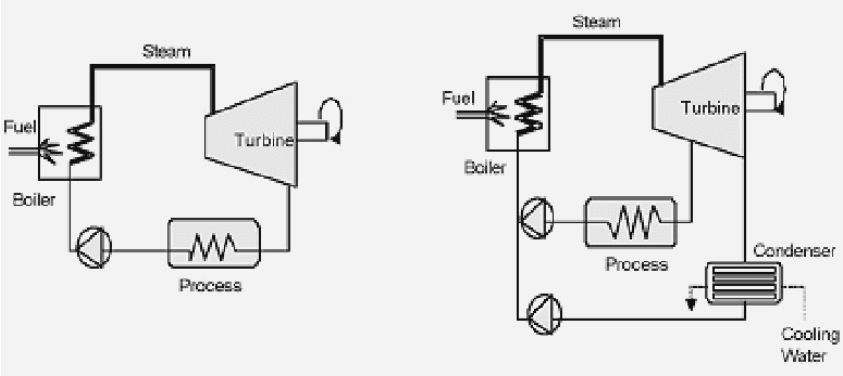
a.Turbin Kondensasi *(Condensing Turbine)*

Condensing turbine adalah jika uap dari turbin keluar menuju tekanan vakum (+/- 0.08 bar) pada condenser untuk dirubah fasanya kembali menjadi air.(Suriaman & Suprayitno, 2022) Pada turbin ini, uap yang telah digunakan dalam proses ekspansi dialirkan menuju kondensor, di mana uap dikondensasikan kembali menjadi air dengan tekanan yang sangat rendah. Proses ini bertujuan untuk memaksimalkan konversi energi dari uap menjadi tenaga mekanik, sehingga efisiensi sistem meningkat. Turbin kondensasi umumnya digunakan dalam pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) karena kemampuannya menghasilkan daya listrik dalam jumlah besar.

b. Turbin Tekenan Balik *(Back Pressure Turbine)*

Berbeda dengan turbin kondensasi, turbin back pressure tidak membuang uap sisa ke kondensor, melainkan mempertahankan tekanan tertentu untuk digunakan dalam proses industri lainnya, seperti pemanasan atau pengolahan bahan. Karena uap keluar masih memiliki tekanan yang cukup, sistem ini lebih

hemat dalam penggunaan air pendingin dan sering diaplikasikan dalam sistem cogeneration untuk meningkatkan efisiensi termal.

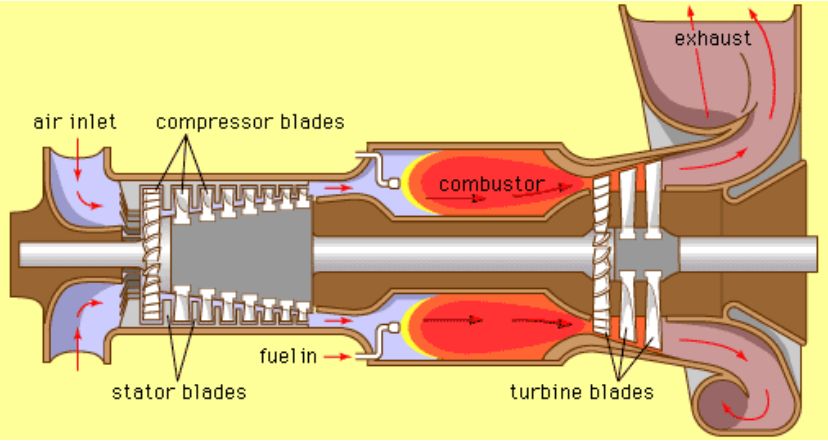


Gambar 2.3.Turbin Back Pressure

2.2.2.3. Berdasarkan Arah Aliran Uap

a.Turbin Aliran Aksial *(Axial Flow Turbine)*

Jenis turbin ini dirancang agar uap mengalir sejajar dengan sumbu rotor. Konfigurasi ini memungkinkan pengaturan aliran uap yang lebih stabil dan efisien, terutama pada sistem dengan kapasitas besar. Oleh karena itu, turbin aliran aksial sering digunakan dalam pembangkit listrik serta industri berat yang membutuhkan output daya tinggi dengan efisiensi optimal.



Gambar 2.4.Turbin Aliran Axial

b.Turbin Aliran Radial *(Radial Flow Turbine)*

Pada turbin ini, uap mengalir secara radial dari luar ke dalam atau sebaliknya. Sistem ini lebih sederhana dibandingkan dengan turbin aliran aksial dan biasanya digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan daya menengah hingga kecil. Karena desainnya yang lebih ringkas, turbin jenis ini lebih mudah dipasang dalam sistem yang memiliki keterbatasan ruang.

2.2.2.4 Berdasarkan Jumlah Tingkat Ekspansi

a.Turbin Satu Tingkat *(Single-Stage Turbine)*

Gambar 2.5.Turbin Satu Tingkat

Turbin satu tingkat hanya memiliki satu set sudu tetap dan satu set sudu gerak, sehingga konversi energi terjadi dalam satu tahap saja. Jenis turbin ini umumnya digunakan pada aplikasi yang membutuhkan daya kecil hingga menengah, seperti dalam sistem pemulihan energi pada industri atau pembangkit listrik berskala kecil.

b.Turbin Multi-Tingkat *(Multi-Stage Turbine)*

Turbin multi-tingkat memiliki beberapa tahap ekspansi untuk meningkatkan efisiensi konversi energi. Dengan memanfaatkan beberapa tingkat sudu tetap dan sudu gerak, energi uap dapat dikonversi secara bertahap, mengurangi kehilangan energi dan meningkatkan efisiensi operasional. Jenis ini banyak diterapkan dalam pembangkit listrik dan industri yang membutuhkan daya besar dalam jangka waktu lama.

Gambar 2.6.Turbin Multi-Tingkat

2.2.3 Prinsip Kerja Turbin Uap

Turbin uap bekerja dengan prinsip mengubah energi termal dari uap bertekanan tinggi menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros turbin. Proses ini dimulai dengan pembangkitan uap di dalam boiler, di mana air dipanaskan hingga mencapai suhu dan tekanan tinggi melalui pembakaran bahan bakar seperti batu bara, gas, atau minyak, atau melalui sumber panas lainnya seperti tenaga nuklir atau panas bumi. Uap yang dihasilkan kemudian diarahkan menuju turbin melalui pipa saluran uap.Ketika uap bertekanan tinggi memasuki turbin, uap tersebut diarahkan ke sudu-sudu turbin yang dirancang sedemikian rupa untuk mengubah energi panas dan tekanan menjadi energi kinetik. Dalam proses ini,Uap yang memancar keluar dari nozel diarahkan ke sudu-sudu turbin yang berbentuk lengkungan yang dipasang disekeliling rotor turbin.(Sinaga et al., 2022)Pergerakan poros ini merupakan bentuk konversi energi dari energi panas menjadi energi mekanik yang selanjutnya dapat dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi.

Dalam pembangkit listrik tenaga uap, energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin digunakan untuk menggerakkan generator listrik. Generator ini bekerja

dengan prinsip induksi elektromagnetik, di mana medan magnet yang berputar akibat pergerakan poros turbin akan menghasilkan arus listrik bolak-balik (AC) yang kemudian dapat didistribusikan ke jaringan listrik.Setelah melewati turbin, tekanan dan suhu uap menurun secara signifikan. Uap sisa ini kemudian dialirkan ke dalam kondensor, yang berfungsi untuk mendinginkan dan mengembunkan uap kembali menjadi air. Air hasil kondensasi ini kemudian dipompa kembali ke dalam boiler untuk dipanaskan kembali, sehingga siklus kerja dapat berulang.

Efisiensi turbin uap sangat bergantung pada berbagai faktor, seperti desain sudu turbin, tekanan dan suhu uap masuk, serta sistem kondensasi yang digunakan. Untuk meningkatkan efisiensi, sering kali digunakan teknologi seperti pemanasan ulang uap (reheating) atau regenerasi (regeneration), di mana sebagian panas yang masih tersisa dalam uap bekas digunakan kembali untuk meningkatkan efisiensi siklus kerja.

2.2.4 Parameter Operasi Turbin Uap

Turbin uap merupakan salah satu mesin konversi energi yang bekerja dengan memanfaatkan energi potensial dari uap bertekanan tinggi untuk diubah menjadi energi mekanis pada poros turbin, yang kemudian digunakan untuk memutar generator listrik. Kinerja turbin uap sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi dan parameter termodinamika yang ada selama proses berlangsung. Parameter-parameter ini menjadi acuan penting baik dalam perancangan, pengoperasian, maupun analisis kinerja turbin. Beberapa parameter utama yang digunakan dalam penelitian ini antara lain tekanan masuk (P1), tekanan keluar (P2), temperatur uap, debit aliran uap (steam flow), serta entalpi masuk (hin) dan entalpi keluar (hout).

1. **Tekanan Uap Masuk (P1)**

Tekanan masuk uap merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi daya yang dihasilkan turbin. Semakin tinggi tekanan uap yang masuk ke turbin, semakin besar energi potensial yang tersedia untuk diubah menjadi kerja mekanis. Pada sistem Rankine cycle, tekanan uap masuk biasanya diatur oleh boiler agar mencapai kondisi optimal sesuai desain turbin. Tekanan yang terlalu rendah dapat menyebabkan turbin kehilangan daya output, sedangkan tekanan yang terlalu tinggi dapat menimbulkan risiko pada komponen turbin.

2. Tekanan Uap Keluar (P2)

Tekanan uap keluar atau tekanan buang dari turbin juga berpengaruh terhadap efisiensi sistem. Umumnya, turbin uap bekerja dengan menurunkan tekanan uap setinggi mungkin agar energi yang diekstraksi dari uap menjadi maksimal. Namun, tekanan keluar tidak boleh terlalu rendah karena dapat menimbulkan masalah seperti erosi pada sudu turbin akibat kondensasi uap. Hubungan antara P1 dan P2 inilah yang menentukan selisih entalpi (Δh) sebagai dasar perhitungan daya input turbin.

3. Temperatur Uap

Selain tekanan, temperatur uap juga sangat memengaruhi efisiensi turbin. Uap dengan temperatur tinggi (superheated steam) memiliki kandungan energi yang lebih besar dibandingkan uap jenuh (saturated steam). Dalam praktiknya, pemanasan lanjut (superheating) sering dilakukan agar uap tetap dalam fase gas sepanjang ekspansi di turbin, sehingga mengurangi kemungkinan kerusakan pada sudu akibat kelembapan. Temperatur juga berkaitan erat dengan kualitas uap (dryness fraction) yang menjadi indikator penting dalam menjaga efisiensi konversi energi.

4. Debit Aliran Uap (Steam Flow)

Debit aliran uap menunjukkan jumlah massa uap yang masuk ke turbin dalam satuan waktu. Parameter ini berperan langsung dalam menentukan daya yang dapat dihasilkan oleh turbin, karena daya masukan sebanding dengan laju aliran massa dikalikan dengan perbedaan entalpi. Jika debit uap terlalu kecil, daya keluaran juga menurun. Sebaliknya, debit uap yang terlalu besar dapat meningkatkan rugi-rugi energi serta menurunkan efisiensi sistem. Oleh karena itu, pengaturan steam flow menjadi salah satu aspek penting dalam pengoperasian turbin uap.

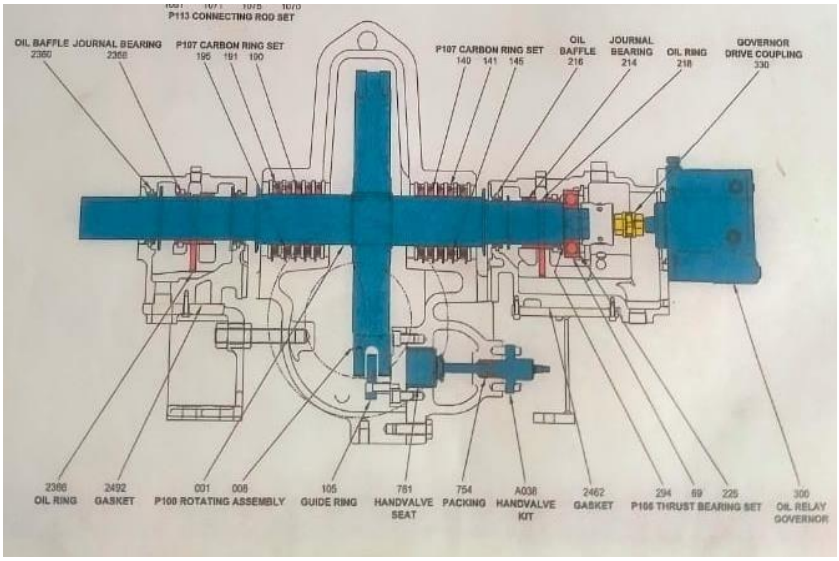
5. Entalpi Masuk (hin) dan Entalpi Keluar (hout)

Entalpi adalah besaran termodinamika yang menyatakan jumlah energi total (panas + kerja) per satuan massa fluida. Dalam analisis turbin uap, entalpi masuk (hin) mewakili energi yang terkandung dalam uap saat memasuki turbin, sedangkan entalpi keluar (hout) menggambarkan energi uap setelah mengalami ekspansi di dalam turbin. Selisih antara hin dan hout merupakan energi yang dikonversi menjadi kerja mekanis pada poros turbin. Dengan demikian, parameter entalpi

menjadi dasar penting untuk menghitung daya masukan (Pin) yang kemudian dibandingkan dengan daya keluaran generator (Pout). energi potensial uap yang disebut juga entalpi uap tergantung pada tekanan dan suhu uap, maka pada penurunan tekanan akan terjadi juga penurunan suhu akibat penurunan tekanan.(Wulandari et al., 2023)

2.2.5 Komponen Turbin Uap

Turbin uap terdiri dari berbagai komponen utama yang berfungsi dalam konversi energi termal dari uap menjadi energi mekanik. Setiap bagian memiliki peran khusus dalam mendukung kinerja optimal turbin, mulai dari pengaturan aliran uap hingga transmisi daya ke poros. Berikut adalah komponen utama yang terdapat pada turbin uap:



Gambar 2.7.Komponen Turbin Uap

1. **Roda Rotor *(Rotor Wheel)***

Rotor Wheel adalah bagian berputar dari turbin yang terdiri dari poros utama dan sudu gerak. Uap yang masuk ke dalam turbin akan mengenai sudu gerak dan menghasilkan gaya dorong yang menyebabkan rotor berputar.Komponen ini harus memiliki ketahanan mekanik tinggi karena harus mampu menahan gaya sentrifugal akibat putaran dengan kecepatan tinggi. Material yang digunakan biasanya adalah paduan baja berkekuatan tinggi agar dapat bertahan terhadap tekanan dan suhu ekstrem.

Gambar 2.8.Rotor wheel Turbine Uap

2. **Stator dan Sudu Tetap *(Guide Ring)***

Stator/Guide ring merupakan bagian tetap dari turbin yang berfungsi sebagai pendukung sudu tetap (nozzle guide vanes). Sudu tetap ini bertugas mengarahkan dan mengatur kecepatan uap sebelum mengenai sudu gerak pada rotor.Pada turbin aksi, sudu tetap berfungsi sebagai nosel yang mengubah tekanan uap menjadi energi kinetik. Sementara pada turbin reaksi, sudu tetap juga ikut mengalami ekspansi uap, sehingga terjadi konversi energi yang lebih efisien.

Gambar 2.9.Guide Ring Turbin Uap

3. Sudu Gerak *(Moving Blades)*

Sudu gerak/moving blades terpasang pada rotor dan merupakan komponen yang langsung menerima dorongan dari uap. Bentuk dan desain sudu gerak sangat berpengaruh terhadap efisiensi turbin, karena mempengaruhi distribusi gaya dan arah aliran uap.Pada turbin multi-tingkat, sudu gerak dapat terdiri dari beberapa lapisan dengan ukuran yang bervariasi untuk menyesuaikan perubahan tekanan dan kecepatan uap secara bertahap.

Gambar 2.10.Moving Blades Turbin uap

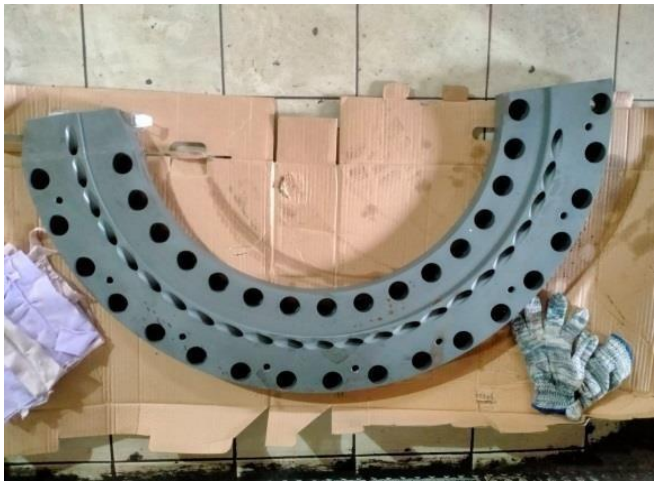
4. Rumah Turbin *(Casing)*

Casing merupakan penutup utama yang melindungi seluruh komponen dalam turbin. Fungsinya adalah menahan tekanan uap dan menjaga agar proses ekspansi uap berlangsung sesuai desain tanpa adanya kebocoran energi.Casing juga dilengkapi dengan jalur masuk dan keluar uap serta berbagai sistem kontrol dan monitoring suhu, tekanan, serta getaran untuk memastikan turbin beroperasi dengan aman.

Gambar 2.11.Casing Turbin Uap

4. Nozel *(Nozzle Guide Vanes)*

Nozel adalah bagian yang berfungsi untuk mengubah tekanan uap menjadi energi kinetik dengan meningkatkan kecepatan aliran uap sebelum mengenai sudu gerak rotor.Pada turbin aksi, nozel ini menjadi komponen utama yang mengatur konversi energi. Sementara pada turbin reaksi, nozel juga turut mengalami ekspansi uap yang membantu meningkatkan efisiensi kerja sistem.



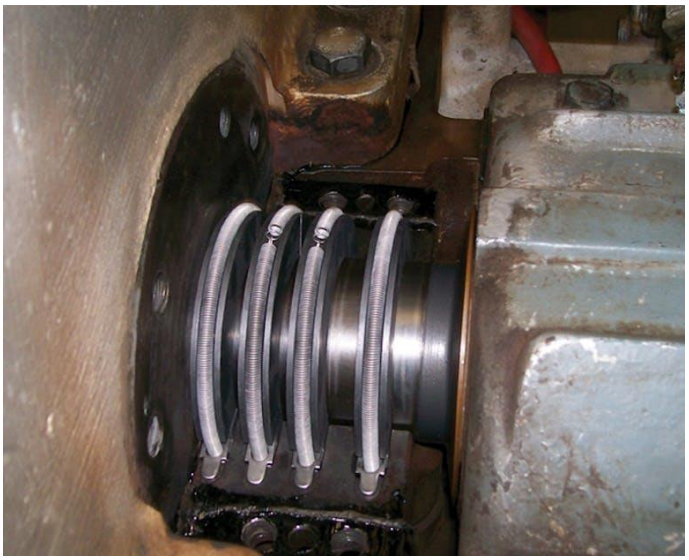
Gambar 2.12.Noozle Turbin Uap

5. Poros *(Shaft)*

Poros adalah elemen utama yang menyalurkan tenaga mekanik dari rotor ke generator atau beban lainnya. Poros harus dirancang dengan ketahanan tinggi karena menerima beban putaran dan gaya sentrifugal yang besar.Poros turbin umumnya dihubungkan dengan generator dalam sistem pembangkit listrik atau dengan peralatan mekanis lain dalam aplikasi industri.

Gambar 2.13.Shaft Turbin Uap

6. **Labirin Seal dan Gland Seal**Labirin seal dan gland seal adalah komponen yang berfungsi untuk mencegah kebocoran uap di sekitar poros rotor. Sistem ini penting untuk mempertahankan efisiensi turbin dan mengurangi kehilangan energi akibat kebocoran uap ke lingkungan sekitar.Labirin seal bekerja dengan prinsip menciptakan jalur berliku-liku untuk memperlambat aliran uap yang bocor, sehingga tekanannya berkurang secara bertahap. Gland seal menggunakan tekanan udara atau uap untuk menutup celah di sekitar poros.

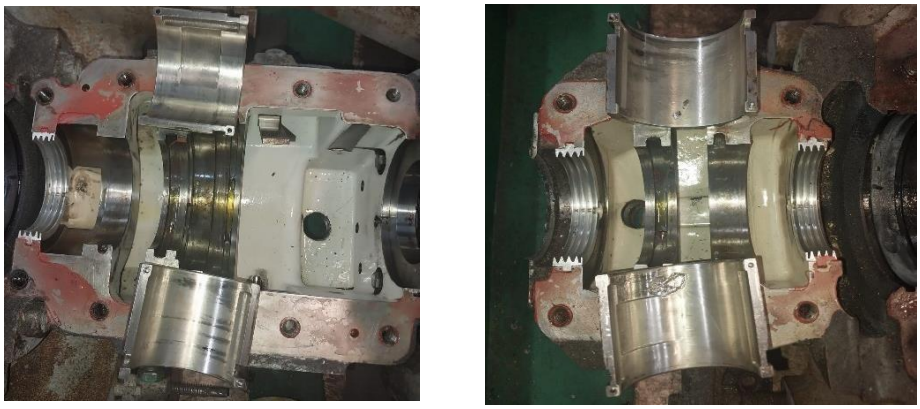


Gambar 2.14.Labirin Seal dan Gland Seal Turbine

8. **Sistem Pelumasan *(Lubrication System)***

Sistem pelumasan bertugas menjaga kelancaran gerakan komponen yang berputar, seperti poros dan bantalan. Pelumas digunakan untuk mengurangi gesekan, mendinginkan komponen, dan memperpanjang umur pakai turbin.Pelumasan yang buruk dapat menyebabkan gesekan berlebih yang berujung

pada overheating atau bahkan kegagalan mekanis. Oleh karena itu, sistem ini harus selalu dipantau dan dirawat secara berkala.



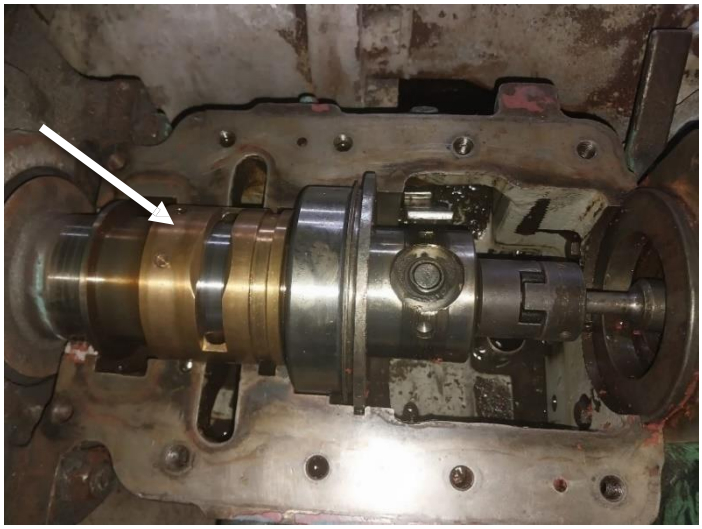
Gambar 2.15. Sistem Pelumasan Pada Bearing dan Shaft Turbine Uap

9. Bantalan *(Bearings)*

Bantalan/Bearing berfungsi sebagai penopang poros rotor untuk menjaga kestabilan putaran dan mengurangi gesekan selama operasi turbin. Terdapat dua jenis utama bantalan pada turbin uap:

a. Bantalan Radial *(Journal Bearing)*

Merupakan salah satu komponen turbin yang berfungsi sebagai bantalan untuk menumpu poros rotor.

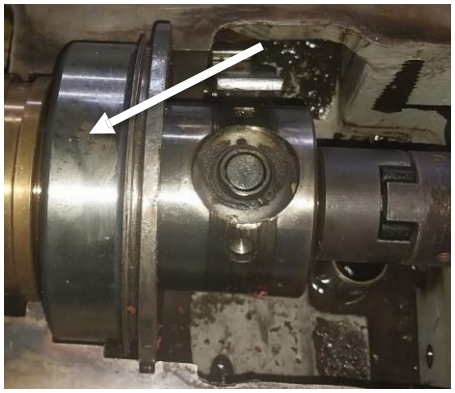


Gambar 2.16.Journal Bearing Turbin Uap

b. Bantalan Aksial *(Thrust Bearing)*

Thrust Bearing merupakan part yang berfungsi untuk menahan atau untuk menerima gaya aksial atau gaya sejajar terhadap poros yang merupakan gerakan maju mundurnya rotor.

Material bantalan biasanya menggunakan paduan logam berkualitas tinggi



Gambar 2.17.Thurst Bearing Turbin Uap

yang tahan terhadap tekanan dan suhu tinggi.Berikut Tabel Batas Suhu Pada Bearing:

Tabel.2.1. Standar Batas Suhu Pada Bearing Turbin Uap Pada PT.Adibrata Unggul Jaya

	Metal Temperature Spring Load Arrangement	*Metal Temperature Embedded Arrangement*	*Oil Temperature at oil return line*
	F / C	F / C	F / C
Maksimum Operating	176/ 80.0	220/104.0	180/82.0
Alarm	185/ 85.0	230/ 110.0	185 / 85.0
Shutdown	203/ 95.0	240/ 116.0	195/ 90.5

10. Sistem Kondensasi dan Pembuangan Uap

Setelah uap digunakan untuk menggerakkan rotor, uap ini perlu dikondensasikan kembali menjadi air agar dapat digunakan kembali dalam siklus pembangkitan uap. Sistem ini terdiri dari:

a. **Kondensor**

Menurunkan tekanan uap keluaran dengan cara mendinginkannya hingga kembali menjadi air.

b. **Pompa Kondensat**

Mengalirkan air hasil kondensasi kembali ke sistem boiler untuk diubah menjadi uap lagi.

Sistem kondensasi ini sangat penting dalam meningkatkan efisiensi termal keseluruhan dan mengurangi pemborosan energi.

2.2.6 Keunggulan dan Karakteristik Turbin Uap

Turbin uap dikenal memiliki efisiensi tinggi dalam mengubah energi termal menjadi energi mekanik, terutama dalam sistem pembangkit listrik dan aplikasi industri berat. Teknologi ini memungkinkan pemanfaatan energi dengan efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan mesin piston konvensional karena menghasilkan putaran yang lebih stabil dan memiliki tingkat gesekan yang lebih rendah.

Selain itu, turbin uap memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap beban kerja yang tinggi dan dapat beroperasi dalam jangka waktu lama tanpa mengalami degradasi performa yang signifikan. Desainnya yang modular juga memungkinkan integrasi dengan sistem pembangkitan energi lainnya, seperti pada pembangkit listrik siklus kombinasi (CCPP), di mana turbin uap dikombinasikan dengan turbin gas untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan.

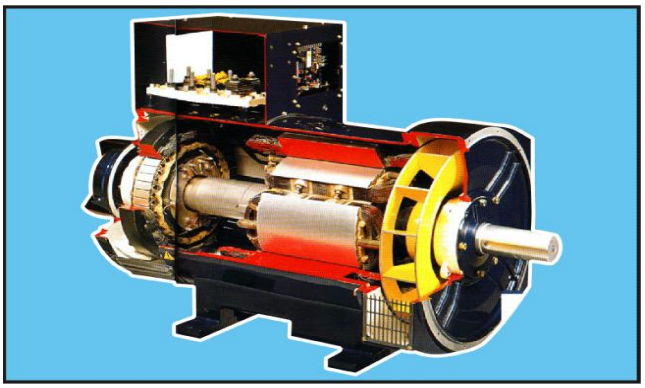
Karakteristik utama dari turbin uap adalah kemampuannya untuk bekerja dalam berbagai kondisi tekanan dan suhu yang ekstrem. Dengan sistem perlindungan seperti gland seal dan labirin seal, kebocoran energi dapat diminimalkan, sehingga meningkatkan efisiensi konversi daya. Selain itu, turbin ini memiliki tingkat kebisingan dan getaran yang lebih rendah dibandingkan dengan mesin berbasis piston, menjadikannya pilihan utama dalam aplikasi industri skala besar.

Turbin uap juga memiliki keunggulan dalam fleksibilitas operasional, di mana dapat digunakan dalam berbagai industri mulai dari pembangkit listrik, pabrik kimia, hingga industri manufaktur yang membutuhkan tenaga mekanis dalam jumlah besar. Keandalan dan efisiensi yang tinggi menjadikan turbin uap sebagai salah satu teknologi utama dalam sistem konversi energi termal hingga saat ini.

2.2.7 Generator Tiga Phasa

Generator listrik adalah salah satu jenis mesin listrik yang banyak dikenal masyarakat khususnya di dunia industri Generator tiga fasa adalah perangkat listrik yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik (AC) dalam tiga gelombang sinusoidal yang berbeda fase satu sama lain. Perbedaan fase antara ketiga gelombang ini adalah sebesar 120 derajat listrik. Sistem tiga fasa ini banyak digunakan dalam industri dan pembangkit listrik karena lebih efisien dibandingkan sistem satu fasa, terutama dalam hal transmisi daya dan distribusi energi listrik dalam jumlah besar.

Generator tiga fasa terdiri dari dua bagian utama, yaitu stator dan rotor. Stator adalah bagian diam yang berisi kumparan yang berfungsi sebagai tempat terjadinya induksi elektromagnetik untuk menghasilkan tegangan listrik. Rotor berputar bersama poros.(Lubis, 2018) Rotor, di sisi lain, merupakan bagian yang berputar dan berfungsi untuk menciptakan medan magnet yang akan berinteraksi dengan kumparan pada stator guna menghasilkan listrik.



Gambar 2.18.Generator Tiga Phasa

2.2.8 Jenis-Jenis Generator Tiga Fasa

2.2.8.1. Berdasarkan Jenis Medan Magnet

Generator tiga fasa dapat dibedakan berdasarkan bagaimana medan magnetnya dihasilkan, yaitu:

a. Generator Sinkron *(Synchronous Generator)*

Generator sinkron merupakan jenis generator tiga fasa yang bekerja dengan prinsip medan magnet berputar yang sinkron dengan frekuensi listrik yang dihasilkan. Rotor pada generator ini biasanya dilengkapi dengan elektromagnet yang menghasilkan medan magnet tetap. Generator sinkron banyak digunakan dalam pembangkit listrik tenaga uap, air, atau gas karena mampu menghasilkan daya listrik dalam jumlah besar secara stabil.

b. Generator Induksi *(Induction Generator)*

Generator induksi disebut juga motor tak serempak merupakan motor arus bolak-balik(ac) yang paling luas digunakan.(Nasution & Hasibuan, 2018) Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke statornya, dimana arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (rotating magnetic field) yang dihasilkan oleh arus stator.(Suwarno & Zambak, 2022).Generator induksi bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik tanpa memerlukan sumber eksitasi eksternal. Generator ini menggunakan rotor dengan kumparan yang menghasilkan medan magnet akibat arus induksi yang muncul saat rotor berputar di dalam medan magnet stator. Karena tidak memerlukan sistem eksitasi tambahan, generator induksi lebih sederhana dan murah, namun memiliki keterbatasan dalam pengendalian tegangan dan frekuensi, sehingga lebih sering digunakan dalam aplikasi tertentu seperti energi terbarukan, misalnya pembangkit listrik tenaga angin.

2.2.8.2. Berdasarkan Cara Eksitasi

Eksitasi dalam generator mengacu pada metode yang digunakan untuk memberikan arus ke medan magnet rotor. Berdasarkan hal ini, generator tiga fasa dibagi menjadi:

a. Generator dengan Eksitasi Terpisah *(Separately Excited Generator)*

Jenis generator ini membutuhkan sumber daya eksternal untuk menyuplai arus eksitasi ke rotor. Sumber ini biasanya berasal dari baterai atau generator kecil yang disebut exciter. Keunggulan dari sistem ini adalah kontrol yang lebih baik terhadap

tegangan keluaran, sehingga sering digunakan pada sistem tenaga listrik dengan kebutuhan regulasi tegangan yang presisi.

b. Generator dengan Eksitasi Sendiri *(Self-Excited Generator)*

Generator ini menggunakan sebagian energi listrik yang dihasilkan untuk memberi arus pada sistem eksitasi. Dengan demikian, generator ini tidak memerlukan sumber daya eksternal untuk medan magnetnya. Meskipun lebih praktis, generator dengan eksitasi sendiri memiliki respons yang lebih lambat terhadap perubahan beban dibandingkan generator dengan eksitasi terpisah.

2.2.8.3. Berdasarkan Metode Pendinginan

Generator tiga fasa juga diklasifikasikan berdasarkan metode pendinginan yang digunakan untuk menjaga suhu operasionalnya agar tidak melebihi batas aman. Beberapa jenis pendinginan yang umum digunakan adalah:

a. Pendinginan Udara *(Air-Cooled Generator)*

Dalam sistem ini, udara digunakan untuk mendinginkan komponen generator, baik melalui pendinginan alami maupun dengan bantuan kipas. Generator dengan sistem pendinginan udara umumnya digunakan pada pembangkit listrik skala kecil hingga menengah, di mana kapasitas daya yang dihasilkan tidak terlalu besar.

a. Pendinginan Minyak *(Oil-Cooled Generator)*

Generator ini menggunakan minyak sebagai media pendingin untuk menyerap panas dari komponen yang bekerja. Minyak tidak hanya berfungsi sebagai pendingin tetapi juga sebagai isolator listrik yang mencegah hubungan pendek antar komponen.

b. Pendinginan Hidrogen *(Hydrogen-Cooled Generator)*

Generator yang digunakan dalam pembangkit listrik berkapasitas besar sering kali menggunakan sistem pendinginan berbasis hidrogen. Hidrogen memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi dibandingkan udara, sehingga mampu membuang panas dengan lebih efisien. Selain itu, hidrogen juga mengurangi gesekan udara di dalam generator, yang dapat meningkatkan efisiensi operasionalnya.

2.2.9 Prinsip Kerja Generator Tiga Phasa

Prinsip generator ini pertama kali ditemukan oleh Michael Faraday, yang menyatakan bahwa perubahan fluks magnetik dalam suatu konduktor akan menghasilkan gaya gerak listrik (GGL) atau tegangan listrik.Dalam konteks pembangkit listrik tenaga uap, generator listrik berperan sebagai komponen akhir dalam sistem konversi energi. Energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin uap ditransfer ke generator melalui poros, yang kemudian mengubahnya menjadi listrik dengan cara memanfaatkan medan magnet dan gerakan konduktor.Pengoperasian generator dituntut suatu kestabilan agar kinerja generator menjadi optimal. Kestabilan generator dapat dipengaruhi oleh beberapa hal, yaitu beban, arus eksitasi, faktor daya, jumlah putaran generator, dan lain sebagainya. Perubahan besar tegangan terminal akibat dihubungkan ke beban akan menyebabkan ketidakstabilan generator.(Manangka et al., 2022)

Pertama, rotor dalam generator berputar akibat tenaga mekanik yang diberikan oleh turbin. Rotor ini memiliki medan magnet yang dihasilkan oleh sistem eksitasi. Ketika medan magnet ini bergerak, ia memotong lilitan kawat yang ada di stator, menyebabkan perubahan fluks magnetik. Perubahan ini menghasilkan gaya gerak listrik (GGL) yang menginduksi arus listrik dalam kumparan stator. Agar generator tiga fasa dapat menghasilkan listrik dengan frekuensi yang stabil (misalnya 50 Hz atau 60 Hz, tergantung pada standar negara masing-masing), kecepatan putaran rotor harus dijaga konstan. Hubungan antara kecepatan rotor dan frekuensi listrik dapat dihitung menggunakan rumus:

$$f = \frac{N \times P}{120} \quad \text{.....(1)}$$

Di mana:

- **f** :frekuensi listrik dalam satuan Hertz (Hz).
- **N** : kecepatan putaran rotor dalam satuan RPM (rotasi per menit).
- **P** : jumlah kutub magnet pada rotor.

Setelah arus listrik dihasilkan, sistem regulasi tegangan berperan dalam menjaga agar tegangan tetap stabil. Sistem eksitasi akan menyesuaikan arus medan pada rotor sesuai dengan kebutuhan daya listrik yang dihasilkan. Dari sini, listrik yang dihasilkan oleh generator masih dalam bentuk arus bolak-balik (AC). Agar dapat digunakan oleh konsumen, listrik ini kemudian disalurkan melalui

transformator untuk meningkatkan tegangan sebelum masuk ke jaringan transmisi listrik.

2.2.10 Komponen Generator SinkronTiga Fasa

Konstruksi generator tiga fasa terdiri dari beberapa bagian utama yang berperan dalam proses konversi energi. Berikut adalah penjelasan mendetail mengenai masing-masing komponen beserta fungsinya:

1. Stator Medan Eksitasi *(Exciter Field Stator)*

Exciter Field Stator Stator adalah bagian penting dari sistem stimulasi generator sinkron yang mencakup medan magnet untuk memberikan arus stimulasi untuk rotor. Komponen ini terdiri dari kumparan stator yang menerima sumber daya untuk membuat medan magnet yang stabil. Medan magnet ini kemudian akan membuat tegangan rotor sistem stimulasi, kemudian aliran iritasi ke arah rotor utama generator. Jika ada perubahan dalam medan magnet ini, arus stimulasi yang disediakan untuk rotor utama juga akan menghadapi osilasi, sehingga memiliki dampak pada stabilitas tegangan daya yang dibuat.

Gambar 2.19.Exciter Field Stator

2. Rator Medan Eksitasi *(Exciter Field Rotor)*

Exciter Field Rotor adalah bagian berputar dalam sistem eksitasi generator sinkron yang berfungsi untuk menghasilkan arus eksitasi. Komponen ini bekerja bersama Exciter Field Stator, di mana medan magnet yang dihasilkan stator menginduksi tegangan pada rotor. Arus eksitasi yang dihasilkan kemudian dialirkan ke rotor utama generator melalui sikat karbon dan cincin seret atau menggunakan sistem tanpa sikat (brushless).Fungsi utama Exciter Field Rotor adalah menjaga kestabilan tegangan keluaran generator dengan mengatur jumlah arus eksitasi yang masuk ke rotor utama. Jika arus eksitasi berubah, maka tegangan keluaran generator

juga akan berubah. Oleh karena itu, Exciter Field Rotor memainkan peran penting dalam menjaga performa generator tetap stabil dan efisien.

Gambar 2.20.Exciter Field Rotor

3. Diode Penyearah Berputar *(Diode Rotating Rectifier)*

Diode Rotating Rectifier (Diode Penyearah Berputar**)** adalah komponen dalam sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation system*) pada generator sinkron. Fungsinya adalah mengubah arus bolak-balik (AC) yang dihasilkan oleh exciter menjadi arus searah (DC) untuk disuplai ke rotor utama generator.Diode ini dipasang pada bagian berputar dari generator dan bekerja secara otomatis tanpa memerlukan kontak mekanis seperti sikat karbon, sehingga mengurangi keausan dan perawatan. Dengan adanya *Rotating Rectifier*, arus eksitasi yang diberikan ke rotor utama menjadi lebih stabil, memastikan tegangan keluaran generator tetap konstan dan efisien selama operasi.

Gambar 2.21.Diode Rotating Rectifier

4. Kabel Rotor Utama

Kabel Rotor Utama adalah penghantar listrik yang berfungsi menyalurkan arus eksitasi dari sistem eksitasi ke belitan rotor utama pada generator sinkron. Kabel ini menghubungkan keluaran dari *Diode Rotating Rectifier* atau sistem eksitasi lainnya ke kumparan rotor, sehingga memungkinkan terbentuknya medan magnet yang stabil di dalam generator.Karena kabel ini terletak pada bagian

berputar, material dan desainnya harus tahan terhadap gaya sentrifugal, panas, dan getaran selama operasi. Kualitas isolasi yang baik juga diperlukan untuk mencegah gangguan listrik dan menjaga efisiensi transfer daya. Kabel Rotor Utama memiliki peran penting dalam memastikan generator dapat menghasilkan tegangan yang stabil dan sesuai dengan kebutuhan sistem kelistrikan.

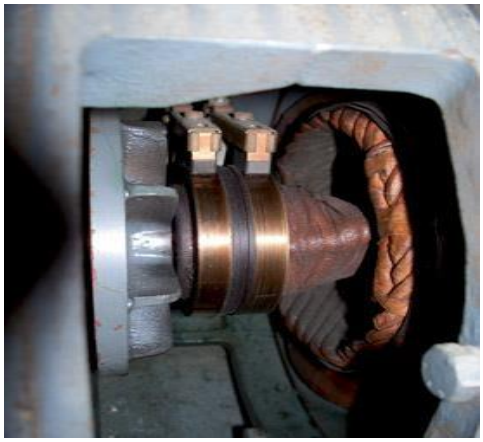
5. Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi berfungsi untuk menyuplai arus eksitasi ke rotor agar dapat menghasilkan medan magnet. Terdapat dua jenis sistem eksitasi:

- **Eksitasi dengan sikat *(Brush excitation system)***, yang menggunakan cincin seret (*slip ring*) dan sikat karbon untuk menyalurkan arus DC ke rotor.
- **Eksitasi tanpa sikat (*Brushless excitation system*)**, yang menggunakan generator eksitasi kecil dengan *Diode Rotating Rectifier* untuk mengubah arus AC menjadi DC tanpa kontak mekanis.

7. Cincin Seret dan Sikat Karbon *(Slip Ring & Brush)*

Cincin seret (slip ring) adalah cincin logam yang terhubung ke rotor untuk menyalurkan arus eksitasi dari sumber eksternal melalui sikat karbon. Komponen ini hanya ada pada generator dengan sistem eksitasi yang menggunakan sikat.



Gambar 2.22.Slip Ring & Brush

8. Rangka atau Rumah Generator

Rangka generator berfungsi sebagai pelindung dan dudukan bagi seluruh komponen generator. Biasanya terbuat dari baja yang kuat untuk menahan gaya mekanik dan melindungi komponen internal dari lingkungan eksternal

Gambar 2.23.Housing Generator

9. Pendingin Generator

Generator memerlukan sistem pendingin untuk menjaga suhu tetap stabil selama beroperasi. Pendinginan dapat dilakukan dengan udara (air cooling), minyak (oil cooling), atau hidrogen (hydrogen cooling) untuk generator berkapasitas besar.

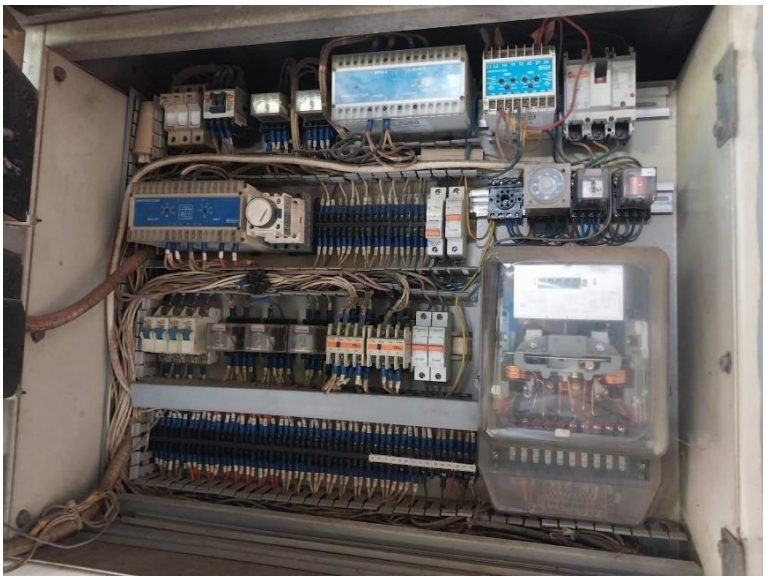
10. Sistem Pengaturan Tegangan *(Automatic Voltage Regulator - AVR)*

Agar tegangan yang dihasilkan tetap stabil meskipun terjadi perubahan beban, generator dilengkapi dengan sistem AVR (Automatic Voltage Regulator). AVR berfungsi untuk mengontrol arus eksitasi ke rotor sehingga tegangan keluaran tetap dalam batas yang diinginkan.

Gambar 2.24.Automatic Voltage Regulator - AVR

11. Terminal Output dan Panel Kontrol

Terminal output adalah bagian di mana kabel listrik terhubung untuk menyalurkan daya yang dihasilkan ke jaringan distribusi pabrik. Sedangkan panel kontrol berfungsi untuk mengawasi parameter operasi generator, seperti tegangan, arus, daya, dan suhu.



Gambar 2.25.Panel Kontrol

2.2.11 Efesiensi Generator

Generator memainkan peran penting dalam menyediakan energi listrik di sistem tenaga. Beban pada generator yang berubah-ubah dalam sistem interkoneksi dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan. Tegangan generator dapat diatur melalui arus eksitasi, yaitu pasokan listrik DC yang menguatkan medan pada generator untuk menghasilkan energi listrik dengan tegangan keluaran yang bergantung pada arus eksitasi.(P. Indonesia et al., 2025)

Efisiensi dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara daya keluaran (output) terhadap daya masukan (input) dalam suatu proses. Efisiensi merupakan persamaan yang penting dalam termodinamika untuk mengetahui seberapa baik konversi energi yang terjadi.(Wijaya et al., 2022)Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan energi panas dari uap bertekanan tinggi yang diarahkan ke sudu-sudu turbin, sehingga menghasilkan gerak putar pada poros turbin. Energi mekanik yang dihasilkan ini kemudian diteruskan ke generator, yang mengubahnya menjadi energi listrik.

Daya masuk (*input*) merupakan energi mekanik yang diterima oleh poros generator dari turbin. Daya ini berasal dari hasil konversi energi uap menjadi putaran mekanis oleh turbin. Daya mekanik ini dapat diketahui melalui beberapa metode, antara lain dari data spesifikasi turbin, logsheet pabrik, atau perhitungan berdasarkan efisiensi system dari Panel Kontrol.

Daya keluar (*output*) adalah energi listrik aktif (*Real Power*) yang dihasilkan oleh generator dan biasanya diukur pada terminal keluaran generator. Daya ini merupakan hasil murni *(Pure)* dari proses konversi energi mekanik ke energi listrik dan belum dipengaruhi oleh perangkat eksternal seperti kapasitor bank. Kapasitor bank sendiri tidak menambah daya aktif, melainkan berfungsi memperbaiki faktor daya sistem.

Perhitungan efisiensi generator pada turbin uap secara umum dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$\eta = \frac{Pout}{Pin}\ x\ 100\%$ ..... (2)

Keterangan:

- η = Efisiensi Generator Turbin Uap (%)
- *Pout* = Daya Listrik Aktif Yang Dihasilkan *(Watt)*
- *Pin* = Daya Mekanik Dari Turbin Yang Masuk Ke Generator *(Watt)*

Daya keluar sendiri biasanya dihitung menggunakan rumus:

$P = \sqrt{3} \times V \times I \times Cos\ \theta$ ……(3)

Di mana:

- V : tegangan antar-linier *(Volt*),
- I : arus beban (*Ampere*),
- Cos θ : adalah faktor daya (*Power Factor*),

Jika data torsi dan kecepatan putar tersedia, daya masuk dapat dihitung melalui rumus:

$Pin = T \times \omega$……(4)

Dengan:

- T = Torsi Pada Poros Generator (Nm)
- ω = Kecepatan Sudut (Rad/s), yaitu 2π×RPM/60

Dalam sistem pembangkitan tenaga listrik turbin uap, umumya daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin akan diteruskan ke generator untuk dikonversi menjadi daya listrik.daya mekanik ini dihitung menggunakan parameter Torsi (T) dan Kecepatan Putaran (RPM)**.** Namun, jika data torsi tidak tersedia dikarenakan keterbatasan alat ukur seperti Torsimeter**,** maka perhitungan daya masuk dapat dilakukan dengan menggunakan data daya output listrik dari generator dan efisiensi dari generator itu sendiri**.**

$Pin = \frac{Pout}{\eta}$ …….(5)

Dengan memahami prinsip kerja ini, maka efisiensi turbin uap dapat digunakan untuk mengevaluasi performa sistem pembangkit dan mencari peluang perbaikan dalam proses konversi energi. Nilai efisiensi yang tinggi menunjukkan bahwa sebagian besar energi mekanik berhasil diubah menjadi energi listrik secara efektif, sementara nilai yang rendah bisa menjadi indikator adanya kehilangan energi yang signifikan akibat gesekan, panas, atau kerugian lainnya dalam sistem.

2.2.12 Termodinamika pada Sistem Turbin Uap

Termodinamika merupakan cabang ilmu fisika yang mempelajari tentang energi, panas, kerja, serta perubahan sifat-sifat zat kerja dalam suatu sistem. Pada pembangkit listrik tenaga uap, prinsip termodinamika berperan penting dalam proses konversi energi panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar menjadi energi mekanik, dan selanjutnya dikonversikan menjadi energi listrik melalui generator.Proses kerja turbin uap dapat dijelaskan menggunakan hukum pertama dan kedua termodinamika.

1. **Hukum Pertama Termodinamika (Kekekalan Energi)**

Hukum ini menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, melainkan hanya dapat diubah bentuknya. Sesuai dengan hukun ini, energi yang diberikan oleh kalor mesti sama dengan kerja eksternal yang dilakukan ditambah dengan perolehan energi dalam karena kenaikan temperatur.(Mariono et al., 2022) Dalam konteks turbin uap, energi panas dari uap hasil pembakaran di boiler diubah menjadi energi kinetik melalui nozzle, kemudian menjadi energi mekanik untuk memutar poros turbin. Energi mekanik inilah yang kemudian dimanfaatkan untuk memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik.

Secara matematis hukum pertama dapat ditulis:

$Q - W = \Delta U$ ..... (6)

dengan:

Q = kalor yang masuk ke sistem,

W = kerja yang dihasilkan sistem,

ΔU = perubahan energi dalam (internal energy).

Pada turbin uap, kerja yang dihasilkan berhubungan dengan perubahan entalpi uap antara kondisi masuk dan keluar turbin.

2. **Hukum Kedua Termodinamika (Entropi dan Irreversibilitas)**

Hukum kedua menekankan bahwa setiap proses nyata selalu disertai dengan peningkatan entropi. Dengan kata lain, tidak semua energi panas dapat diubah menjadi kerja, karena sebagian akan hilang sebagai kerugian (losses). Inilah alasan mengapa efisiensi turbin uap tidak pernah mencapai 100%.

Dalam turbin, irreversibilitas dapat berupa gesekan fluida, kebocoran uap, maupun rugi-rugi mekanis pada sudu turbin. Oleh karena itu, konsep efisiensi isentropik digunakan untuk membandingkan kinerja nyata turbin dengan kondisi ideal yang dianggap tanpa kerugian.

3. **Siklus Termodinamika Rankine**

Sistem turbin uap pada dasarnya bekerja mengikuti siklus Rankine Siklus Rankine merupakan siklus ideal untuk sistem pusat listrik tenaga uap.(Sinaga et al., 2022), yang terdiri dari empat proses utama:

- Pemanasan air di boiler (proses isobar),

- Ekspansi uap di turbin (proses isentropik ideal, tapi nyata selalu disertai losses),
- Kondensasi di kondensor (proses isobar),
- Penaikan tekanan oleh pompa (proses isentropik).

Dalam siklus nyata, setiap proses mengalami penyimpangan dari ideal. Oleh karena itu, analisis termodinamika diperlukan untuk menghitung efisiensi siklus, menentukan titik kerja optimal, serta mengidentifikasi faktor penyebab rugi-rugi energi.

4. Peran Entalpi dalam Analisis

Entalpi merupakan salah satu parameter penting dalam perhitungan termodinamika turbin uap. Nilai entalpi pada kondisi masuk (hin) dan keluar (hout)turbin digunakan untuk menghitung kerja yang dihasilkan turbin, yaitu:

$Wt = hin - hout$ ..... (7)

Semakin besar selisih entalpi antara masuk dan keluar, semakin besar pula energi mekanik yang dapat dihasilkan turbin. Namun, faktor efisiensi sangat menentukan seberapa besar energi ini dapat benar-benar dimanfaatkan menjadi energi listrik.

2.2.13 Laju Alir Massa Uap

Dalam sistem pembangkit tenaga uap, salah satu parameter operasi yang paling penting adalah laju alir massa uap (steam flow rate). Parameter ini menunjukkan seberapa banyak uap yang mengalir menuju turbin dalam satuan waktu tertentu. Secara sederhana, laju alir uap dapat diartikan sebagai jumlah massa uap yang melewati suatu penampang per satuan waktu. Nilai ini sangat menentukan berapa besar energi yang dibawa oleh uap, karena energi termal yang terkandung di dalam uap akan dikonversi menjadi energi mekanis ketika melewati turbin, dan pada akhirnya diubah lagi menjadi energi listrik oleh generator.

Secara matematis, laju alir massa uap dinyatakan dalam bentuk:

$$m = \frac{dm}{dt} \quad \text{.....(8)}$$

Dengan keterangan:

m = laju alir massa (kg/s)

dm = perubahan massa uap (kg)

dt = perubahan waktu (s)

Dalam praktik industri, khususnya pada pabrik kelapa sawit, satuan laju alir massa uap biasanya ditampilkan dalam ton per jam (TPH). Pemakaian satuan ini dianggap lebih sederhana karena mudah dibaca dan dipahami oleh operator yang terbiasa dengan hitungan tonase per jam produksi. Akan tetapi, untuk keperluan perhitungan energi dan analisis termodinamika, satuan TPH tidak dapat digunakan secara langsung.

Alasannya adalah karena hampir semua rumus termodinamika, termasuk perhitungan daya turbin, efisiensi, maupun neraca energi, menggunakan standar satuan internasional (SI), yaitu kilogram (kg) untuk massa dan detik (s) untuk waktu. Oleh sebab itu, diperlukan konversi dari TPH ke kg/s agar data laju alir uap dapat digunakan dalam analisis perhitungan.

Konversi dilakukan dengan memperhatikan hubungan antara satu ton dan satu kilogram (1 ton = 1000 kg), serta hubungan antara satu jam dan satu detik (1 jam = 3600 detik). Dari dasar tersebut diperoleh persamaan:

$m = TPH \times \frac{1000}{3600}$……..(9)

Dengan demikian, semakin besar laju alir massa uap, semakin besar pula potensi daya yang dapat dihasilkan. Namun, hal ini tidak berarti bahwa efisiensi sistem selalu meningkat seiring dengan meningkatnya laju alir uap. Dalam kenyataannya, ada titik tertentu di mana penambahan laju alir uap justru memperbesar rugi-rugi energi, sehingga daya keluaran tidak bertambah sebanding dengan daya masukan.

Selain menentukan daya keluaran, laju alir massa uap juga memengaruhi kondisi operasi turbin. Jika aliran terlalu kecil, energi yang dihasilkan tidak cukup untuk memutar generator secara stabil. Sebaliknya, jika aliran terlalu besar, sebagian energi akan terbuang karena turbin dan generator tidak mampu mengonversinya dengan optimal. Oleh karena itu, menjaga laju alir uap pada tingkat yang sesuai dengan kapasitas desain turbin merupakan faktor kunci untuk mempertahankan efisiensi sistem.

Dalam konteks pabrik kelapa sawit, pengaturan laju alir uap menjadi semakin penting karena konsumsi uap tidak hanya digunakan untuk pembangkitan listrik, tetapi juga untuk proses produksi, seperti perebusan tandan buah segar (TBS). Jika laju alir uap yang dialirkan ke turbin terlalu tinggi, maka ketersediaan

uap untuk proses produksi bisa berkurang. Sebaliknya, jika laju alir uap ke turbin terlalu rendah, daya listrik yang dihasilkan tidak mencukupi untuk kebutuhan pabrik. Oleh karena itu, keseimbangan dalam distribusi uap menjadi sangat penting agar seluruh sistem dapat berjalan secara efisien.

Dengan kata lain, laju alir massa uap tidak hanya sekadar angka operasional, tetapi merupakan variabel penting yang menghubungkan antara energi panas dari boiler, energi mekanis di turbin, dan energi listrik di generator. Konversi laju alir dari TPH ke kg/s adalah langkah mendasar agar data yang diperoleh di lapangan dapat digunakan dalam analisis teknis secara akurat.

2.2.14 Daya Isentropis

Daya isentropis merupakan besaran teoritis yang digunakan untuk menggambarkan kerja maksimum yang dapat dihasilkan oleh suatu turbin uap apabila proses ekspansi uap berlangsung secara ideal, yaitu mengikuti kondisi isentropik (tanpa adanya perubahan entropi). Secara sederhana, daya isentropis adalah daya yang seharusnya dihasilkan oleh turbin apabila tidak terdapat rugi-rugi energi akibat gesekan, kebocoran, kelembaban uap, maupun faktor-faktor non-ideal lainnya. Oleh karena itu, parameter ini sangat penting dalam menilai kinerja dan efisiensi aktual dari sebuah sistem turbin uap.

Secara matematis, daya isentropis dapat ditentukan melalui persamaan:

dengan:

$Wisentropis = m \times (hin - hout)$..... (10)

$Wisentropis$: Daya Isentropis (kW),

m : Laju Aliran Massa Uap (kg/s atau Tbs/h),

hin : Entalpi Spesifik Uap Pada Kondisi Masuk Turbin (kJ/kg),

$hout$: entalpi spesifik uap pada kondisi keluar turbin (kJ/kg).

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa besarnya daya isentropis dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu jumlah massa uap yang mengalir dan perbedaan entalpi antara kondisi masuk dan keluar turbin. Semakin besar debit uap yang masuk, semakin besar pula energi yang dapat dimanfaatkan. Demikian pula, semakin besar selisih entalpi masuk dan keluar, semakin besar daya teoritis yang dapat dihasilkan oleh turbin.

Dalam konteks termodinamika, entalpi masuk (hin) biasanya ditentukan dari kondisi uap superheated yang dihasilkan oleh boiler, sedangkan entalpi keluar (hout) ditentukan dari kondisi ekspansi uap pada tekanan exhaust turbin. Perbedaan keduanya merepresentasikan jumlah energi panas yang berhasil diubah menjadi energi mekanis pada poros turbin dalam kondisi ideal.

Namun dalam kenyataan operasional, turbin tidak pernah bekerja secara ideal. Adanya rugi-rugi energi menyebabkan daya actual(W aktual) yang dihasilkan lebih rendah daripada daya isentropis. Hubungan antara keduanya biasanya dinyatakan melalui efisiensi isentropik turbin:

$$\eta = \frac{Waktual}{Wis}\ x\ 100\% \quad (11)$$

Nilai efisiensi isentropik ini menjadi parameter penting untuk membandingkan performa nyata turbin terhadap kondisi ideal. Misalnya, apabila efisiensi isentropik suatu turbin adalah 85%, maka dapat dikatakan bahwa turbin hanya mampu mengubah 85% dari potensi energi teoritis menjadi energi mekanis aktual, sementara sisanya hilang sebagai rugi-rugi energi. Dalam praktik industri pembangkit, efisiensi aktual sistem konversi energi jarang mencapai nilai desain karena berbagai faktor termodinamika non-ideal. Sebagai contoh, analisis di PLTP Kamojang menunjukkan efisiensi generator aktual rata-rata sebesar 92,89 %, sedangkan efisiensi desainnya mencapai 98,4 %—turun sebesar 5,51 % akibat rugi-rugi operasional(Muharrir & Hajar, 2019).

2.2.15 Entalpi dan Entropi pada Sistem Termodinamika Turbin Uap

1. Entalpi (h)

Entalpi merupakan salah satu besaran penting dalam termodinamika yang digunakan untuk menggambarkan kandungan energi pada suatu zat kerja, khususnya pada sistem yang melibatkan aliran fluida seperti turbin uap. Secara definisi, entalpi adalah jumlah energi dalam (internal energy) suatu sistem ditambah dengan energi akibat tekanan dan volume (flow energy). Hubungan matematisnya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$h = u + p.v \quad (11)$$

Dengan:

h = Entalpi Spesifik (Kj/Kg),

u = Energi Dalam Spesifik (Kj/Kg)

p = Tekanan (Kpa),

v = Temperatur Mutlak (K).

Dalam sistem turbin uap, entalpi digunakan untuk menilai perubahan energi pada fluida kerja (uap air) ketika mengalami proses pemanasan di boiler, ekspansi di dalam turbin, maupun kondensasi di kondensor. Misalnya, ketika uap superheated masuk ke turbin pada entalpi masuk, kemudian keluar pada entalpi keluar maka selisih entalpi tersebut merepresentasikan energi yang berhasil diubah menjadi kerja mekanis pada poros turbin.

2. Entropi (s)

Selain entalpi, besaran lain yang memiliki peranan penting adalah entropi. Entropi secara fisik dapat dipahami sebagai ukuran ketidakteraturan (disorder) dalam suatu sistem, atau dalam konteks termodinamika, sebagai indikator jumlah energi yang tidak dapat dimanfaatkan untuk melakukan kerja.

Secara matematis, perubahan entropi pada suatu proses dapat dituliskan sebagai:

$$ds = \frac{\delta Qrev}{T} \quad (12)$$

Dengan:

ds = Perubahan Entropi (Kj/Kg·K),

$\delta Qrev$ = Kalor Reversibel (Kj/Kg),

Pada turbin uap, konsep entropi digunakan untuk menilai apakah suatu proses ekspansi berlangsung mendekati ideal (isentropik) atau tidak. Apabila entropi masuk dan entropi keluar turbin memiliki nilai yang sama, maka proses tersebut disebut proses isentropik. Namun pada kenyataannya, entropi selalu bertambah akibat irreversibilitas proses, sehingga efisiensi aktual lebih rendah dibandingkan kondisi ideal.

Misalnya, ekspansi uap dari boiler ke turbin diharapkan berlangsung isentropik agar kerja turbin maksimum. Akan tetapi, faktor gesekan fluida, kebocoran, serta kondensasi parsial menyebabkan entropi di sisi keluaran lebih besar dibandingkan di sisi masukan. Akibatnya, sebagian energi yang seharusnya dapat dimanfaatkan hilang sebagai energi yang tidak berguna. Dalam penelitian

yang dilakukan di Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBM), efisiensi isentropik spesifikasi turbin tercatat sekitar 64,60 %, sedangkan efisiensi aktual selama empat hari operasional berkisar antara 65,4 % hingga 66,43 %—nilai yang tetap lebih rendah dari kondisi ideal karena peningkatan entropi selama proses ekspansi uap(Danial et al., 2019)

2.2.16 Rugi-Rugi Energi pada Turbin Uap

1. Rugi-Rugi Energi

Dalam sistem pembangkitan listrik berbasis turbin uap, tidak seluruh energi yang masuk ke dalam sistem dapat dikonversi menjadi energi listrik secara sempurna Daya adalah energi yang dikeluarkan untuk menjalankan bisnis dalam sistem tenaga listrik.(Pasaribu et al., 2020) Hal ini disebabkan oleh adanya rugi-rugi energi (energy losses) yang terjadi selama proses konversi dari energi termal menjadi energi mekanis, dan selanjutnya menjadi energi listrik. Rugi-rugi energi muncul akibat ketidaksempurnaan proses nyata dibandingkan dengan kondisi ideal yang diasumsikan dalam hukum-hukum termodinamika.

Secara umum, rugi-rugi energi pada turbin uap dapat dibagi menjadi beberapa kategori, antara lain:

1. Rugi-rugi Termal

Terjadi karena adanya kehilangan panas dari fluida kerja (uap air) ke lingkungan. Misalnya, panas hilang pada dinding pipa, boiler, atau turbin akibat konduksi dan radiasi. Kehilangan panas ini mengurangi energi yang seharusnya tersedia untuk menghasilkan kerja pada turbin.

2. Rugi-rugi Mekanis

Terjadi akibat gesekan pada bantalan (bearing), gesekan fluida dengan sudu turbin (blade friction), serta kebocoran uap pada seal dan celah-celah kecil. Energi yang seharusnya diubah menjadi kerja mekanis sebagian terbuang dalam bentuk panas akibat gesekan tersebut.

3. Rugi-rugi Hidrodinamis

Disebabkan oleh turbulensi dan ketidaksempurnaan aliran uap saat melewati sudu turbin. Kondisi ini membuat sebagian energi kinetik uap tidak seluruhnya diubah menjadi energi mekanis.

4. Rugi-rugi Kelistrikan (Electrical Losses)

Terjadi pada generator, misalnya akibat resistansi kumparan (I^2R losses), rugi inti besi (iron losses),Kehilangan ini mengurangi daya listrik keluaran meskipun daya mekanis dari turbin relatif besar.

2. Hubungan Rugi-Rugi Energi dengan Rugi-Rugi Daya

Walaupun sering digunakan secara bergantian**,** rugi-rugi energi (*energy losses*) dan rugi-rugi daya (*power losses*) sebenarnya memiliki makna yang berbeda namun saling berkaitan.

- **Rugi-rugi Energi** mengacu pada total energi yang hilang dalam suatu periode waktu tertentu, biasanya dinyatakan dalam satuan kJ, MJ, atau kWh. Rugi daya merupakan besarnya energi listrik yang hilangsecara percuma (tidak terpakai) akibat faktor tahanan dari kumparan medan dan kumparan jangkar generator yang menghambat arus mengalir pada kumparan tersebut pada saat generator dibebani.(Muna et al., 2023) Contohnya adalah jumlah panas yang hilang selama 1 jam operasi turbin.
- **Rugi-rugi Daya** menunjukkan laju kehilangan energi pada setiap satuan waktu, biasanya dinyatakan dalam kW atau MW. Dengan kata lain, rugi-rugi daya merupakan bentuk instan dari rugi-rugi energi.

BAB III
METODEOLOGI

3.1 Waktu Dan Tempat Penelitian

Dalam pelaksanaan Penelitian ini, pengambilan data dilakukan di PTPN IV UNIT PKS BERANGIR beralamat di Jl.Jalinsum,Simpang Marbau,Kec.Na IX-X, Kabupaten Labuhan batu Utara, Sumatera Utara yang dilaksanakan pada bulan juli mulai tanggal 23 – 28 juli 2025 dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1.Waktu Dan Tempat Penelitian

NO	URAIAN	BULAN KE								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Kajian literatur									
2	Penyusunan proposal penelitian									
3	Penulisan Bab 1 sampai 3									
4	Seminar Proposal									
5	Penelitian dan pengambilan data									
6	Analisa Data									
7	Seminar Hasil									
8	Sidang Akhir									

3.2 Alat Dan Bahan

Dalam penelitian ini, terdapat berbagai bahan dan peralatan yang digunakan untuk menganalisis serta mengolah data terkait Variasi Beban Generator Terhadap Efesiensi Output Listrik Turbine Uap Adapun bahan dan alat yang digunakan meliputi:

3.2.1 Alat

1. Panel Kontrol Turbin Uap

Panel kontrol turbin uap berfungsi sebagai pusat pengendalian dan pemantauan operasi turbin. Melalui panel ini, operator dapat memantau parameter penting seperti tekanan, temperatur, kecepatan putaran (RPM), tegangan, arus, hingga daya keluaran generator. Selain itu, panel kontrol juga dilengkapi dengan sistem proteksi untuk mencegah kerusakan apabila terjadi kondisi abnormal, misalnya lonjakan beban atau penurunan tekanan uap. Dengan adanya panel kontrol, proses pengoperasian turbin dapat dilakukan secara lebih aman, efisien,

dan terkendali. Panel Kontrol merupakan suatu panel berfungsi untuk memantau dan mengukur parameter operasi generator dengan alat ukur seperti Arus,Tegangan,Frekuensi,Daya Keluar (Pout),dan Faktor Daya.

Gambar 3.1. Kontrol Panel Turbin Uap

1. Turbin Uap

Turbin uap berfungsi sebagai pengubah energi termal uap menjadi energi mekanik berupa putaran poros. Energi mekanik inilah yang kemudian dimanfaatkan untuk menggerakkan generator.Turbin yang digunakan dengan spesifikasi sebagai berikut:

Gambar 3.2.Turbin Uap

Tabel 3.1. Nameplate Turbine Shinko

Shinko Turbine			
Merk/Type:	Shinko/ RB4M	Turbine speed:	5292 Rpm
Output:	800 Kw	Output Shaft Speed :	1500 Rpm
Steam Press.:	18 kg/cm²	Steam temp.:	240 c

Steam temp.:	3.2 kg/cm²	Weight:	07-2018
Serial No.:	1133818		

2. Generator

Generator digunakan untuk mengkonversi energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik. Variasi beban generator menjadi salah satu fokus pengamatan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap tingkat efisiensi.Spesifikasi Generator yang digunakan sebagai berikut:

Gambar 3.3.Generator

Tabel 3.2. Spesifikasi Generator Standford

Stanford Generator			
Serial Number :	X18c115706	Phase :	3
Frame/Core :	HC 1634j2	PF :	0.85
Base Rating (Kva):	1000(BR)	Duty :	Continues (s1)
Base Rating (Kw):	800	Excitation Voltage :	58.0
Amperes(BR)	1519.4	Excitation Current :	3.4
Frequency:	50 Hertz	Insulation Class :	Class H
Rpm :	1500	Ambient Temperature :	40 C
Voltage :	380	Enclosure :	IP23

3. Pressure Gauge

Pressure gauge digunakan untuk mengetahui besarnya tekanan uap pada sisi masuk maupun keluar turbin. Data tekanan ini diperlukan untuk menilai kondisi operasi dan mendukung perhitungan efisiensi.

Gambar 3.4.Pressure Gauge

4. Temperatur Gauge

Temperature gauge berfungsi mengukur suhu uap pada titik-titik tertentu, baik sebelum masuk turbin maupun setelah proses ekspansi. Hasil pengukuran temperatur menjadi acuan dalam menganalisis siklus termodinamika.

Gambar 3.5.Temperatur Gauge

5. Boiler

Boiler merupakan peralatan yang menghasilkan uap dengan memanfaatkan panas hasil pembakaran bahan bakar. Uap yang diproduksi dari boiler ini kemudian dialirkan menuju turbin untuk menghasilkan energi mekanik.Berikut Spesifikasi boiler sebagai berikut:

Gambar 3.6.Boiler

Tabel 3.3 *Nameplate Boiler*

Maxitherm			
Model	DLFX22-29-P	Hydrostatic Test Pressure	4350 KPA
Serial Number	MB/W-267	Heating Surface	648.99 M
Boiler Rating	22000 Kg/Hr	Date of Hydrostatic	March,2023
Design Pressure	2900 KPA	Design Code	ASMESec1.2019
Design Temp.	250	Year Build	2022

6. Panel Kontrol Boiler

Gambar 3.7.Kontrol Panel Boiler

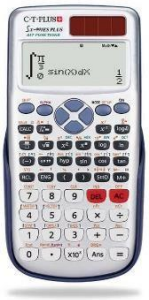
Panel kontrol boiler berfungsi untuk mengawasi sekaligus mengendalikan operasi boiler. Beberapa parameter pengukuran penting yang ditampilkan antara lain tekanan,steamflow, temperatur, level air, serta aliran bahan bakar, yang semuanya berpengaruh terhadap kualitas uap yang dipasok ke turbin.

7. Laptop

Sebagai alat untuk membuat laporan skripsi, mengrangkum data-data observasi.

Gambar 3.8.Laptop

8. Kalkulator Kalkulator untuk menghitung hasil data, sehingga menghasilkan data yang akurat (pasti).



Gambar 3.9.Kalkulator

9. Perangkat Lunak (Software) Perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan penelitian dan penulisan tugas akhir ini adalah:
   - Microsoft Word : Digunakan sebagai penyusunan laporan tugas akhir.
   - Microsoft Excel : Digunakan sebagai penyesunan pengimputan hasil data yang sudah di ambil dari lapangan.
   - Microsoft Power Point : Digunakan sebagai penyusunan laporan tugas akhir untuk presentasi supaya hasil dari penyusunan laporan akhir tersebut dapat disampaikan dengan baik dan benar.

3.2.2 Bahan

Adapun bahan berdasarkan data dari penelitian ini adalah :

1. Laju Aliran Massa Uap (Ton/H)
2. Tekanan Uap Masuk (Bar)
3. Tekanan Uap Keluar (Bar)
4. Arus (I)
5. Tegangan (V)
6. Faktor Daya (Cos q)
7. Daya Output Generator (KW)

3.3 Prosedur Penelitan

Setelah mendapat keseluruhan data dan penyusunan konsumsi energi Listrik, maka perlu dilakukan adalah:

1. Melakukan analisis efesiensi beban pada output generator turbin uap .
2. Mengetahu faktor-faktor yang mempengaruhi tinggi dan rendahnya tingkat beban listrik pada pabrik PTPN IV UNIT PKS BERANGIR
3. Melakukan Perhitungan Efensiensi daya yang dipakai oleh pihak pabrik selama 6 hari

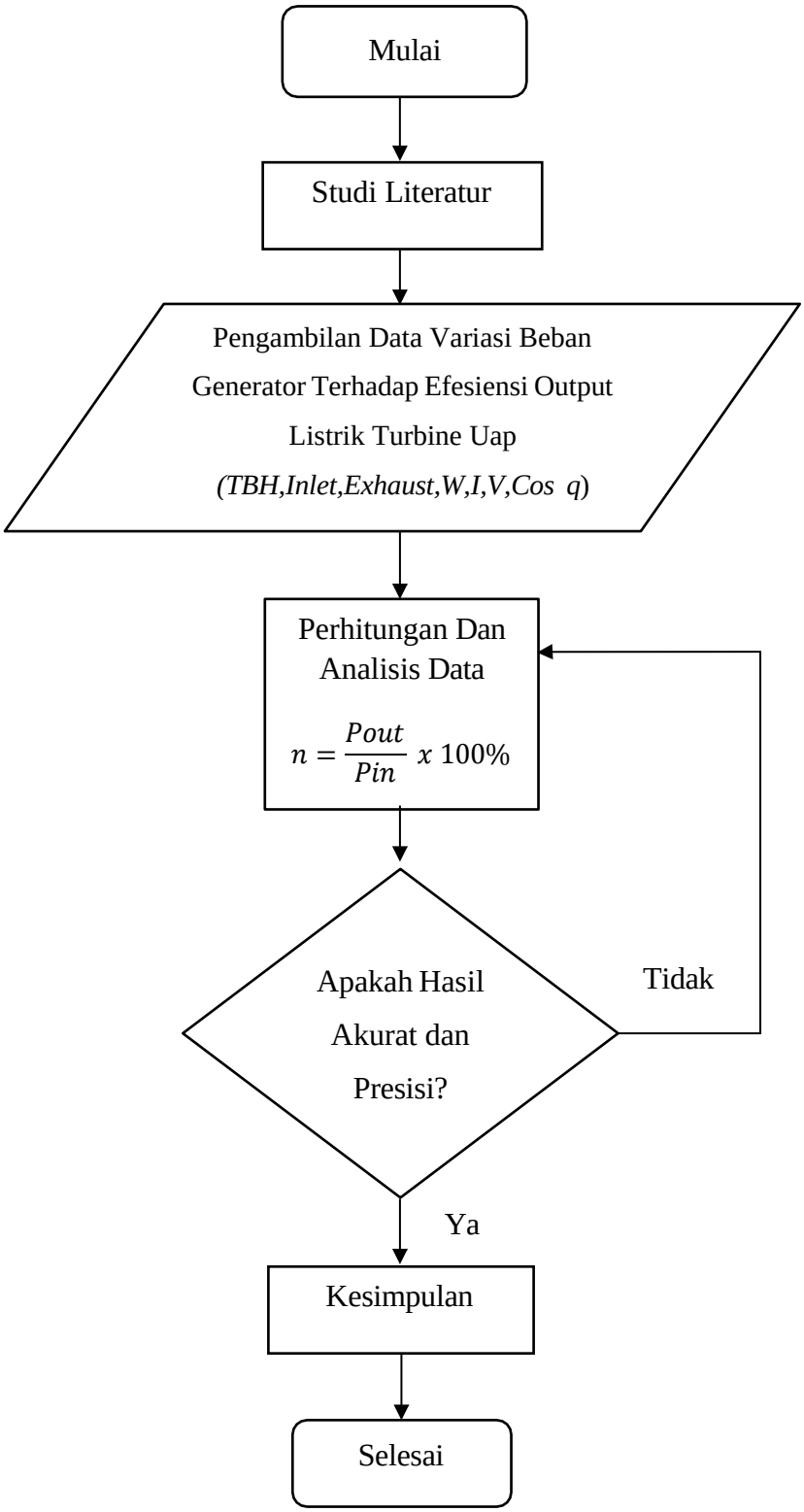
3.4 Metode Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan Menganalisis Efesiensi generator Turbin uap pada bulan Juli 2025 bertempatan di PTPN IV UNIT PKS BERANGIR,Jl. Jalinsum, Simpang Marbau, Kec. Na IX-X, Kabupaten Labuhanbatu Utara, Adapun langkah-langkah yang harus dilakukan dan diketahui penelitian dalam pelaksanaan tugas akhir ini yaitu sebagai berikut:

1. Menyiapkan alat dan bahan penelitian
2. Mengambil data Laju Aliran Massa Uap,Tekanan Uap Masuk,Tekanan Uap Keluar,Arus,Tegangan,Faktor Daya,Daya Output Generator.
3. Melakukan input data Software Microsoft Excel
4. Melakukan perhitungan dan analisis data
5. Melakukan analisis dan evaluasi hasil data efesiensi daya pada beban generator turbin uap.
6 Mengambil kesimpulan dari hasil analisis yang telah di laksanakan.

3.5 Bagan Alir Penelitian

Diagram alir penelitian dalam penelitian ini digunakan pada gambar flowchart dibawah ini.



BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Ptpn Iv Unit Pks Berangir , yang merupakan salah satu pabrik kelapa sawit yang berlokasi di Berangir,Kabupaten Labuhan Batu Selatan,Sumatra Utara. Pabrik ini memiliki unit pembangkit listrik berbasis turbin uap yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di lingkungan pabrik. Sumber energi utama berasal dari boiler, yang memanfaatkan serat dan cangkang kelapa sawit sebagai bahan bakar. Boiler menghasilkan uap bertekanan dan bertemperatur tinggi yang kemudian dialirkan menuju turbin uap. Energi kinetik dari aliran uap tersebut digunakan untuk memutar turbin, yang selanjutnya dihubungkan dengan generator guna menghasilkan energi listrik.

4.2 Data Hasil Penelitian

Data penelitian diperoleh langsung dari pengukuran pada sistem pembangkit listrik tenaga uap di Ptpn Iv Unit Pks Berangir Pengambilan data dilakukan selama 6 hari Berturut-turut pada beberapa variasi Parameter seperti:

1. Tekanan Inlet (Bar)
2. Steamflow (Ton/H)
3. Tekanan BPV (exhaust) (Bar)
4. Entalpy Masuk (Kj/Kg)
5. Entaply Keluar (Kj/Kg)
6. Temperatur (℃)
7. Tegangan (V)
8. Arus (I)
9. Daya(kW)

Berikut datanya sebagai berikut:

Tabel 4.1 Hasil Analisis Penelitian

NO	Tekanan (Bar)	Entalpy In (Kj/Kg)	Steam Flow (Tbs/h)	Exhaust (Bar)	Entalpy out (Kj/Kg)	Temperatur (C)	Tegangan (V)	Arus (A)	Pout (Kw)	Cos q
1	18	2794.81	23.78	2.2	2710.6	123.27	380	846	536.8	0.85
2	19	2796.09	24.168	2.4	2714.55	126.09	380	842	536.8	0.85
3	20	2797.21	24.126	2.2	2710.6	123.27	380	831.4	524.8	0.85
4	19	2796.09	24.24	2.2	2710.6	123.27	380	848	533.6	0.85
5	19	2796.09	24.26	2.6	2796.09	128.73	380	814	512.8	0.85
6	19	2796.09	24.28	2	2706.29	120.23	380	790	509.2	0.85

Berdasarkan Tabel 4.1 terlihat bahwa setiap variasi beban generator memberikan perubahan pada parameter operasi turbin uap. Tekanan uap masuk ke turbin berada pada rentang 18–20 bar dengan temperature Steam keluar (BPV) sekitar 120–126 °C. Nilai entalpi masuk (hin) berkisar antara 2794–2797 kJ/kg, sedangkan entalpi keluar (hout) tercatat pada kisaran 2706–2714 kJ/kg.

Laju aliran uap (steam flow) cenderung meningkat seiring kenaikan beban generator, dari 23,78 Tbs/h pada kondisi awal hingga mencapai 24,28 Tbs/h pada kondisi beban tertinggi. Hal ini menunjukkan adanya penyesuaian konsumsi uap untuk menjaga kestabilan daya keluaran generator.

Pada sisi kelistrikan, tegangan generator dipertahankan konstan sebesar 380 V, sementara arus dan daya keluaran bervariasi mengikuti perubahan beban. Arus mengalami perubahan dari 846 A menjadi 790 A, sedangkan daya keluaran tercatat dalam rentang 536,8 kW hingga 509,2 kW. Perubahan daya ini tidak selalu bersifat linier karena dipengaruhi faktor daya maupun kondisi operasi turbin. Faktor daya (cos φ) sendiri relatif stabil, yaitu sekitar 0,85.

4.3 Perhitungan Daya Masuk Dan Daya keluar Turbin

Daya masukan (Pin) pada generator berasal dari energi mekanis yang dihasilkan oleh turbin uap. Turbin berfungsi mengubah energi uap menjadi tenaga putar yang kemudian digunakan untuk menggerakkan generator. Perhitungan daya masukan ini mengacu pada data hasil penelitian pada tanggal 23 Juli – 27 Juli 2025 yang tercantum dalam Tabel 4.1. Uap yang masuk ke turbin dalam kondisi *saturated* sehingga mampu memberikan energi optimal untuk memutar poros turbin.

Sementara itu, daya keluaran (Pout) generator dihitung berdasarkan beban listrik yang digunakan oleh pabrik. Semakin besar kebutuhan beban, maka semakin besar pula daya listrik yang dihasilkan oleh generator. Dalam proses konversi energi pada turbin uap dan generator, terdapat rugi-rugi yang tidak dapat dihindari. Rugi-rugi ini pada dasarnya dapat dibedakan menjadi dua, yaitu rugi-rugi daya dan rugi-rugi energi.

Rugi-rugi daya merujuk pada kehilangan energi per satuan waktu dengan satuan Watt (W) atau kilowatt (kW). Contoh rugi daya adalah panas akibat resistansi lilitan generator, rugi mekanis akibat gesekan pada poros turbin, serta rugi inti pada sistem kelistrikan. Rugi daya inilah yang menyebabkan perbedaan antara daya masukan (Pin) dan daya keluaran (Pout) generator pada setiap pengukuran.

Sementara itu, rugi-rugi energi adalah akumulasi rugi daya dalam suatu periode waktu tertentu. Besarnya dinyatakan dalam satuan Joule (J) atau kilowatt-hour (kWh). Dengan kata lain, apabila rugi daya yang terjadi sebesar 5 kW dan generator beroperasi selama 2 jam, maka rugi energi total yang dialami adalah 10 kWh.

Dalam penelitian ini, analisis lebih difokuskan pada variasi beban generator terhadap output listrik turbin uap, karena perhitungan efisiensi generator dilakukan dengan membandingkan daya keluaran (Pout) terhadap daya masukan (Pin) pada setiap kondisi beban. Namun demikian, secara praktis bagi industri, rugi-rugi energi total selama periode operasi juga penting untuk diperhatikan, karena berhubungan langsung dengan biaya operasional dan konsumsi bahan bakar boiler. Perhitungan daya keluaran menggunakan data arus, tegangan, serta faktor daya yang juga tercantum pada Tabel 4.1.

1). Data pengukuran pada hari Senin,23 Juli 2024

Tekanan masuk turbin = 18 Bar = 1,8 MPa

Tekanan Keluar Turbin (BPV) = 2.2 Bar = 2,2 MPa

Tempratur Keluar = 123.27 ºC

Laju aliran uap = 23.78 T/h

Entalpi Masuk = 2794.81 Kj/Kg

Entalpi Keluar = 2710.6 Kj/kg

Daya Keluar (Pout) = 536.8 Kw

$$m = \text{TPH} \times \frac{1000}{3600}$$

$$m = 23.78 \times \frac{1000}{3600}$$

$$m = \frac{23780}{3600}$$

$$m = 6.59166\ Kg/s$$

$$Wisentropis = m \times (hin - hout)$$

$$= 6.59166\ Kg/s \times (2794.81\ Kj/Kg - 2710.6\ Kj/kg)$$

$$= 555{,}08\ Kw$$

Daya yang dihasilkan generator berdasarkan hasil pengukuran adalah sebesar 0.55508MW. Jika dikonversikan, daya keluaran generator per jamnya mencapai 555.8 Kw/h.

2). Data pengukuran pada hari Selasa,24 Juli 2024

Tekanan masuk turbin = 19 Bar = 1,9 MPa

Tekanan Keluar Turbin (BPV) = 2.4 Bar = 2.4 MPa

Tempratur Keluar = 126.09ºC

Laju aliran uap = 24.168 T/h

Entalpi Masuk = 2796.09 Kj/Kg

Entalpi Keluar = 2714.55 Kj/kg

Daya Keluar (Pout) = 536.8 Kw

$$m = \text{TPH} \times \frac{1000}{3600}$$

$$m = 24.168 \times \frac{1000}{3600}$$

$$m = \frac{24168}{3600}$$

$m = 6.7111\ Kg/s$

$Wisentropis = m \times (hin - hout)$
$= 6.7111\ Kg/s \times (2796.09\ Kj/Kg - 2714.55\ Kj/kg)$
$= 547.2\ Kw$

Pada hari berikutnya, tercatat daya keluaran generator sebesar 0.5472 MW, sehingga energi listrik yang dihasilkan per jamnya adalah 547.2 Kw/h.

3). Data pengukuran pada hari Rabu,25 Juli 2024
Tekanan Masuk Turbin = 20 Bar = 2.0 MPa
Tekanan Keluar Turbin (BPV)= 2.2 Bar = 2.2 MPa
Tempratur Keluar = 126.09ºC
Laju aliran uap = 24.126 T/h
Entalpi Masuk = 2797.21 Kj/Kg
Entalpi Keluar = 2710.6 Kj/kg
Daya Keluar (Pout) = 524.8 Kw

$$m = TPH \times \frac{1000}{3600}$$

$$m = 24.126 \times \frac{1000}{3600}$$

$$m = \frac{24126}{3600}$$
$m = 6.7438\ Kg/s$

$Wisentropis = m \times (hin - hout)$
$= 6.7438\ Kg/s \times (2797.21\ Kj/Kg - 2710.6\ Kj/kg)$
$= 584\ Kw$

Pengukuran pada hari ketiga menunjukkan generator menghasilkan daya sebesar 0.584MW, yang bila dihitung per jam setara dengan 584 kWh.

4). Data pengukuran pada hari Kamis,26 Juli 2024

Tekanan Masuk Turbin = 19 Bar = 1.9 MPa

Tekanan Keluar Turbin (BPV)= 2.2 Bar = 2.2 MPa

Tempratur Keluar = 123.27ºC

Laju aliran uap = 24.24 T/h

Entalpi Masuk = 2796.09 Kj/Kg

Entalpi Keluar = 2710.6 Kj/kg

Daya Keluar (Pout) = 533.6 Kw

$$m = TPH \times \frac{1000}{3600}$$

$$m = 24.24 \times \frac{1000}{3600}$$

$$m = \frac{24240}{3600}$$

$$m = 6.7016\ Kg/s$$

$$Wisentropis = m \times (hin - hout)$$

$$= 6.7016\ \ Kg/s \times (2796.09 Kj/Kg - 2710.6\ Kj/kg)$$

$$= 572.9\ Kw$$

Hasil pengamatan menunjukkan daya generator mencapai 0.5729 MW, sehingga energi per jam yang dihasilkan adalah 572.9 kWh.

5). Data pengukuran pada hari Jum'at,27 Juli 2024

Tekanan Masuk Turbin = 19 Bar = 1.9 MPa

Tekanan Keluar Turbin (BPV)= 2.6 Bar = 2.6 MPa

Tempratur Keluar = 123.27ºC

Laju aliran uap = 24.26 T/h

Entalpi Masuk = 2796.09 Kj/Kg

Entalpi Keluar = 2796.09 Kj/kg

Daya Keluar (Pout) = 512.8 Kw

$$m = TPH \times \frac{1000}{3600}$$

$$m = 24.24 \times \frac{1000}{3600}$$

$$m = \frac{24260}{3600}$$

$$m = 6.7388\ Kg/s$$

$$Wisentropis = m \times (hin - hout)$$

$$= 6.7388\ Kg/s \times (2796.09 Kj/Kg - 2796.09\ Kj/kg)$$

$$= 525\ Kw$$

Generator pada hari ini menghasilkan daya sebesar 0,525 MW, dengan daya keluaran per jam sebesar 525 kWh.

6). Data pengukuran pada hari Sabtu,28 Juli 2024

Tekanan Masuk Turbin = 19 Bar = 1.9 MPa

Tekanan Keluar Turbin (BPV)= 2 Bar = 2 MPa

Tempratur Keluar = 120.23ºC

Laju aliran uap = 24.28 T/h

Entalpi Masuk = 2796.09 Kj/Kg

Entalpi Keluar = 2706.29 Kj/kg

Daya Keluar (Pout) = 509.2 Kw

$$m = TPH \times \frac{1000}{3600}$$

$$m = 24.28 \times \frac{1000}{3600}$$

$$m = \frac{24280}{3600}$$

$$m = 6.7388\ Kg/s$$

$$Wisentropis = m \times (hin - hout)$$

$$= 6.7388\ Kg/s \times (2796.09 Kj/Kg - 2706.29 Kj/kg)$$

$$= 605\ Kw$$

Daya keluaran generator yang diperoleh pada hari terakhir pengambilan data adalah 0.605 MW, sehingga dapat dihitung energi listrik per jam sebesar 605 kWh.

Berdasarkan metode perhitungan yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, data hasil pengamatan selama enam hari telah diolah untuk mengetahui kinerja generator pada variasi beban yang diberikan. Dari hasil pengolahan tersebut diperoleh nilai daya masukan (Pin) yang dihitung berdasarkan parameter pengukuran di lapangan, serta daya keluaran (Pout) yang terbaca dari output generator. Kedua nilai ini kemudian digunakan untuk menentukan efisiensi sistem pembangkitan, sehingga dapat terlihat seberapa besar energi input yang berhasil diubah menjadi energi listrik.

Hasil perhitungan yang dilakukan disajikan dalam bentuk tabel agar lebih mudah dipahami dan dianalisis. Penyajian data dalam tabel ini dimaksudkan untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai perbandingan antara nilai daya masukan, daya keluaran, serta efisiensi pada tiap hari pengamatan. Dengan demikian, dapat dilakukan analisis lebih lanjut mengenai hubungan antara variasi beban generator terhadap efisiensi listrik yang dihasilkan turbin uap.

Tabel 4.2.Hasil Perhitungan Analisa P input dan P output Generator

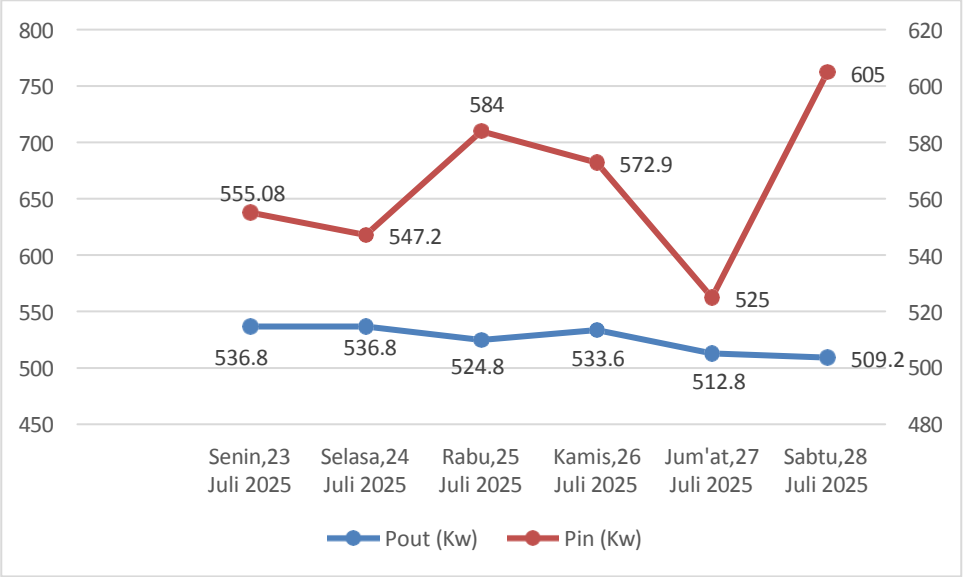
Hari/Tanggal	P1 (Bar)	P2 (Bar)	Temperatur (°C)	Steam Flow (Tbs/h)	Pin (Kw)	Pout (Kw)
Senin,23 Juli 2025	18	2.2	123.27	23.78	555.1	537
Selasa,24 Juli 2025	19	2.4	126.09	24.168	547.2	537
Rabu,25 Juli 2025	20	2.2	123.27	24.126	584	525
Kamis,26 Juli 2025	19	2.2	123.27	24.24	572.9	534
Jum'at,27 Juli 2025	19	2.6	128.73	24.26	525	513
Sabtu,28 Juli 2025	19	2	120.23	24.28	605	509

Berdasarkan Tabel 4.2, terlihat bahwa nilai daya masukan (Pin) dan daya keluaran (Pout) generator mengalami fluktuasi selama pengamatan tanggal 23–28 Juli 2025. Pin berada pada kisaran 525–605 kW, sedangkan Pout berada pada rentang 509,2–536,8 kW. Perbedaan nilai keduanya menunjukkan adanya rugi-rugi energi dalam sistem turbin uap.

Daya keluaran tertinggi dicapai pada 23 dan 24 Juli 2025 sebesar 536,8 kW, meskipun daya masukan berbeda, yaitu 555,08 kW dan 547,2 kW. Kondisi ini menunjukkan sistem bekerja lebih efisien pada beban menengah. Sebaliknya, pada 28 Juli 2025, meskipun Pin meningkat hingga 605 kW, Pout justru turun ke titik

terendah yaitu 509,2 kW, yang menandakan penurunan performa akibat meningkatnya rugi-rugi energi.

Secara keseluruhan, peningkatan Pin tidak selalu berbanding lurus dengan Pout. Pada beban yang terlalu tinggi, daya keluaran cenderung menurun. Hal ini memperlihatkan bahwa kondisi operasi paling optimal terjadi pada beban menengah, di mana keseimbangan input dan output dapat dicapai dengan lebih baik.menunjukkan bahwa pada hari ini generator bekerja dengan efisiensi yang cukup tinggi.



Grafik 4.1.Perbandingan daya masuk (pin) dan daya keluar (Pout) Generator

Berdasarkan Grafik 4.1, terlihat bahwa daya masukan (Pin) selalu lebih besar dibandingkan daya keluaran (Pout) selama periode 23–28 Juli 2025.

Pada awal pengamatan, Pin tercatat 555,08 kW dengan Pout 536,8 kW, lalu cenderung stabil hingga 24 Juli. Peningkatan signifikan terjadi pada 25 Juli dengan Pin mencapai 584 kW, meskipun Pout justru menurun ke 524,8 kW. Kondisi serupa juga tampak pada 28 Juli, di mana Pin naik tajam hingga 605 kW, sedangkan Pout turun ke titik terendah yaitu 509,2 kW.

Secara umum, Pout relatif stabil di kisaran 509–536 kW, sementara Pin lebih berfluktuasi antara 525–605 kW. Hal ini menegaskan bahwa efisiensi generator sangat dipengaruhi oleh variasi beban serta kondisi operasi turbin uap.

4.4 Perhitungan Efisiensi Beban Generator

Efisiensi generator merupakan perbandingan antara daya keluaran listrik (Pout) dengan daya masukan mekanis dari turbin uap (Pin). Perhitungan ini penting dilakukan untuk mengetahui seberapa besar energi input yang dapat dikonversi menjadi energi listrik yang bermanfaat.Berikut Spesifikasi Generator yang digunakan PKS PTPN IV Berangir:

Tabel 4.3 Spesifikasi Generator yang digunakan PTPN IV Berangir

Stanford Generator			
Serial Number :	X18c115706	Phase :	3
Frame/Core :	HC 1634j2	PF :	0.85
Base Rating (Kva):	1000(BR)	Duty :	Continues (s1)
Base Rating (Kw):	800	Excitation Voltage :	58.0
Amperes(BR)	1519.4	Excitation Current :	3.4
Frequency:	50 Hertz	Insulation Class :	Class H
Rpm :	1500	Ambient Temperature :	40 C
Voltage :	380	Enclosure :	IP23

Generator yang digunakan pada penelitian ini adalah Stanford Generator dengan serial number X18c115706. Generator ini memiliki frame/core HC 1634j2 dan beroperasi dengan sistem tiga fasa. Kapasitas dayanya cukup besar, yaitu 1000 kVA atau setara dengan 800 kW, dengan power factor (PF) 0,85.

Generator ini dirancang untuk beroperasi secara kontinu (duty S1), sehingga cocok digunakan pada sistem pembangkit listrik yang membutuhkan operasi jangka panjang tanpa henti. Pada kondisi operasi nominal, generator ini menghasilkan tegangan 380 Volt, frekuensi 50 Hertz, serta arus sebesar 1519,4 Ampere. Putaran nominalnya adalah 1500 rpm, yang menunjukkan bahwa generator ini bekerja pada sistem sinkron dengan frekuensi standar di Indonesia.

Untuk kebutuhan eksitasi, generator ini memerlukan tegangan eksitasi sebesar 58 Volt dengan arus eksitasi 3,4 Ampere. Dari sisi ketahanan, generator ini menggunakan kelas isolasi H, yang berarti mampu bekerja pada suhu operasi yang cukup tinggi. Selain itu, spesifikasi generator menunjukkan kemampuan beroperasi pada suhu lingkungan hingga 40 °C, dengan enclosure IP23 yang memberikan perlindungan terhadap benda padat berukuran lebih dari 12 mm dan tetesan air dari arah tertentu.

Berdasarkan data hasil perhitungan sebelumnya, nilai Pin dan Pout pada setiap variasi beban kemudian dihitung untuk memperoleh efisiensi generator. Perhitungan menggunakan data dari tanggal 23–28 Juli 2025.

1).Data perhitungan pada hari Senin, 23 Juli 2025

$$n = \frac{Pin}{Pout}\ x\ 100\%$$

$$n = \frac{555.08\ kW}{536.8\ kW}\ x\ 100\%$$

$$n = 96.7\%$$

Pada Senin, 23 Juli 2025, dengan daya masukan (Pin) sebesar 555,08 kW dan daya keluaran (Pout) 536,8 kW, diperoleh efisiensi sebesar 96,72%.

2). Data perhitungan pada hari Selasa,24 Juli 2025

$$n = \frac{Pin}{Pout}\ x\ 100\%$$

$$n = \frac{547.2\ kW}{536.8\ kW}\ x\ 100\%$$

$$n = 98.09\%$$

Pada Selasa, 24 Juli 2025, Pin tercatat 547,2 kW dengan Pout 536,8 kW, sehingga efisiensi mencapai 98,09%, nilai tertinggi selama pengamatan.

3). Data perhitungan pada hari Rabu,25 Juli 2025

$$n = \frac{Pin}{Pout}\ x\ 100\%$$

$$n = \frac{584\ kW}{524.8\ kW}\ x\ 100\%$$

$$n = 89.9\%$$

Pada Rabu, 25 Juli 2025, Pin meningkat menjadi 584 kW, sementara Pout turun ke 524,8 kW, menghasilkan efisiensi sebesar 89,85%.

4). Data perhitungan pada hari Kamis,26 Juli 2025

$$n = \frac{Pin}{Pout}\ x\ 100\%$$

$$n = \frac{572.9\ kW}{533.6\ kW}\ x\ 100\%$$

$$n = 93.14\%$$

Pada Kamis, 26 Juli 2025, Pin sebesar 572,9 kW dan Pout 533,6 kW, sehingga efisiensi tercatat 93,14%

5). Data perhitungan pada hari Jum'at,27 Juli 2025

$$n = \frac{Pin}{Pout}\ x\ 100\%$$

$$n = \frac{525\ kW}{512.8\ kW}\ x\ 100\%$$

$$n = 97.68\%$$

Pada Jumat, 27 Juli 2025, Pin mengalami penurunan menjadi 525 kW dengan Pout 512,8 kW, sehingga efisiensi berada pada level 97,68%.

6). Data perhitungan pada hari Sabtu,28 Juli 2025

$$n = \frac{Pin}{Pout}\ x\ 100\%$$

$$n = \frac{605\ kW}{509.2\ kW}\ x\ 100\%$$

$$n = 84\%$$

Pada Sabtu, 28 Juli 2025, Pin naik tajam ke 605 kW, sedangkan Pout turun menjadi 509,2 kW, sehingga efisiensi hanya mencapai 84,16%, nilai terendah selama pengamatan.

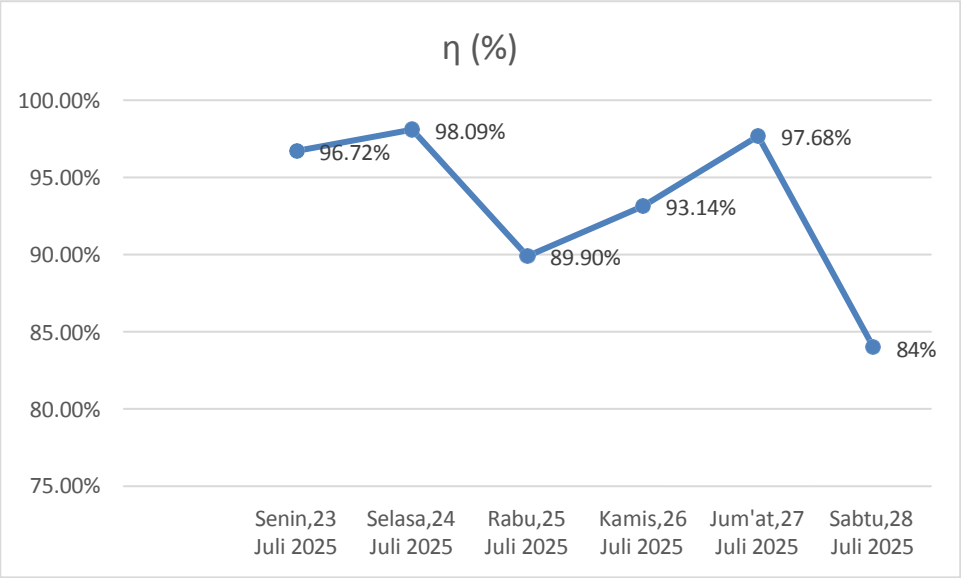
Secara umum, efisiensi generator berada pada rentang 84–98%, dengan variasi yang dipengaruhi oleh kondisi beban generator, konsumsi uap, serta kestabilan operasi turbin. Hal ini menegaskan bahwa performa generator tidak hanya ditentukan oleh besarnya daya masukan, tetapi juga oleh faktor teknis lain yang memengaruhi proses konversi energi dari turbin uap menjadi energi listrik.

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Efisiensi Generator

Hari/Tanggal	P1 (Bar)	P2 (Bar)	Temperatur (°C)	Steam Flow (Tbs/h)	Pin (Kw)	Pout (Kw)	η (%)
Senin,23 Juli 2025	18	2.2	123.27	23.78	555.1	536.8	96.72
Selasa,24 Juli 2025	19	2.4	126.09	24.168	547.2	536.8	98.09
Rabu,25 Juli 2025	20	2.2	123.27	24.126	584	524.8	89.9
Kamis,26 Juli 2025	19	2.2	123.27	24.24	572.9	533.6	93.14
Jum'at,27 Juli 2025	19	2.6	128.73	24.26	525	512.8	97.68
Sabtu,28 Juli 2025	19	2	120.23	24.28	605	509.2	84

Berdasarkan Tabel 4.2, dapat dilihat bahwa nilai daya masukan (Pin), daya keluaran (Pout), serta efisiensi (η) generator mengalami fluktuasi selama periode 23–28 Juli 2025. Nilai Pin berkisar antara 525 kW hingga 605 kW, sedangkan Pout berada pada rentang 509,2 kW hingga 536,8 kW. Perbedaan antara Pin dan Pout tersebut mencerminkan adanya rugi-rugi energi yang tidak dapat dihindari dalam sistem pembangkitan listrik berbasis turbin uap.

Efisiensi yang dihasilkan secara umum masih berada pada kisaran tinggi, yakni antara 84% hingga 98,09%. Nilai tertinggi dicapai pada 24 Juli 2025 dengan efisiensi 98,09%, ketika Pin relatif rendah (547,2 kW) namun Pout tetap stabil (536,8 kW). Kondisi ini menunjukkan bahwa beban menengah memberikan kinerja optimal, di mana energi uap yang masuk dapat dimanfaatkan secara efektif dengan rugi-rugi minimal. Sebaliknya, nilai efisiensi terendah terjadi pada 28 Juli 2025, yaitu hanya 84%, meskipun Pin mencapai nilai terbesar (605 kW). Fenomena ini menandakan bahwa peningkatan daya masukan tidak selalu diikuti peningkatan daya keluaran, bahkan cenderung menurunkan efisiensi akibat bertambahnya rugi-rugi energi baik secara mekanis, termal, maupun kelistrikan.



Grafik 4.2 Efesiensi beban Generator

Berdasarkan grafik 4.2, terlihat bahwa kenaikan variasi beban pada generator memberikan pengaruh langsung terhadap kinerja turbin uap. Pada saat beban rendah, nilai efisiensi yang dihasilkan masih relatif kecil karena daya keluaran listrik belum optimal dibandingkan dengan daya input yang diterima turbin. Seiring dengan meningkatnya beban, efisiensi mengalami kenaikan yang signifikan hingga mencapai titik optimal. Hal ini menunjukkan bahwa turbin bekerja lebih efektif ketika beban generator berada pada kondisi menengah hingga mendekati beban nominal.

Namun, pada beban yang lebih tinggi, efisiensi cenderung menurun kembali. Penurunan ini dapat disebabkan oleh meningkatnya rugi-rugi energi, baik pada sistem turbin, generator, maupun distribusi listrik. Dengan demikian, grafik ini memperlihatkan adanya titik optimum beban generator yang mampu menghasilkan efisiensi paling tinggi, yang menjadi acuan penting dalam pengoperasian turbin uap agar sistem dapat bekerja dengan lebih stabil dan ekonomis.

4.5 Analisis Perbandingan Hasil Variasi Beban Selama 6 Hari Terhadap Daya Input Dengan Daya Output

Tabel 4.5 Hasil Perbadingan Pin dan Pout

Hari/Tanggal	Pin (Kw)	Pout (Kw)	Losses (Kw)
Senin,23 Juli 2025	555.1	536.8	18.28
Selasa,24 Juli 2025	547.2	536.8	10.4
Rabu,25 Juli 2025	584	524.8	59.2
Kamis,26 Juli 2025	572.9	533.6	39.3
Jum'at,27 Juli 2025	525	512.8	12.2
Sabtu,28 Juli 2025	605	509.2	95.8

Berdasarkan hasil perhitungan dari tabel 4.5 selama enam hari berturut-turut, mulai 23 sampai 28 Juli 2025, memperlihatkan adanya perbedaan yang cukup jelas antara daya masukan (Pin) dengan daya keluaran (Pout) generator. Dari data yang diperoleh, Pin selalu lebih tinggi daripada Pout. Hal ini menunjukkan bahwa selama proses konversi energi dari turbin uap ke generator, terdapat rugi-rugi energi (losses) yang tidak bisa dihindari. Besarnya losses ini berbeda-beda setiap hari, dan erat kaitannya dengan variasi beban yang diterapkan pada generator.

Pada hari pertama, Senin 23 Juli 2025, Pin yang masuk sebesar 555,08 kW, sedangkan Pout mencapai 536,8 kW. Selisih daya hanya sekitar 18,3 kW, sehingga efisiensi sistem masih tinggi, yaitu 96,7%. Kondisi semakin baik pada Selasa 24 Juli 2025, ketika Pin sedikit menurun menjadi 547,2 kW dan Pout tetap 536,8 kW. Rugi-rugi yang terjadi hanya sekitar 10,4 kW, dan efisiensi naik hingga 98,1%. Nilai ini merupakan efisiensi tertinggi yang dicapai selama periode penelitian. Dari sini terlihat bahwa beban menengah menghasilkan performa terbaik, karena hampir semua energi masukan bisa dikonversi menjadi daya listrik.

Situasi mulai berubah pada hari Rabu 25 Juli 2025. Pin justru naik cukup besar menjadi 584 kW, namun Pout malah turun ke 524,8 kW. Selisihnya melebar hingga 59,2 kW, dan efisiensi turun drastis ke 89,9%. Kondisi ini mengindikasikan bahwa penambahan beban tidak selalu membuat output meningkat. Sebaliknya, pada titik tertentu justru muncul kerugian energi yang lebih besar sehingga sistem bekerja kurang efisien.

Pada hari Kamis,tanggal26 Juli 2025, memperlihatkan perbaikan. Pin menurun menjadi 572,9 kW sementara Pout naik tipis ke 533,6 kW. Losses ikut mengecil ke 39,3 kW, dan efisiensi kembali membaik menjadi 93,1%. Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan beban ke arah menengah mampu mengurangi kerugian energi dan membuat sistem lebih stabil.

Pada hari Jumat,tanggal 27 Juli 2025, kondisi generator terlihat cukup ideal. Pin tercatat 525 kW dengan Pout 512,8 kW, sehingga rugi-rugi hanya 12,2 kW. Efisiensi sistem mencapai 97,7%, yang kembali menegaskan bahwa beban sedang adalah titik operasi yang paling menguntungkan.

Pada hari Sabtu,tanggal 28 Juli 2025, Pin melonjak hingga 605 kW, tertinggi selama pengamatan, tetapi Pout justru turun ke titik terendah yaitu 509,2 kW. Losses membengkak menjadi 95,8 kW, dan efisiensi merosot hingga 84,1%. Kondisi ini dengan jelas menunjukkan bahwa beban yang terlalu tinggi tidak hanya gagal meningkatkan daya keluaran, tetapi juga memperbesar kerugian energi dalam sistem.

Jika dilihat secara keseluruhan, pola yang muncul adalah: pada beban menengah, losses lebih kecil (sekitar 10–20 kW) sehingga efisiensi bisa bertahan di atas 96%. Namun saat beban ditingkatkan terlalu tinggi, losses bisa melonjak sampai hampir 100 kW, dan efisiensi turun ke bawah 90%. Pola ini sesuai dengan teori yang menyebutkan bahwa turbin uap memiliki titik operasi optimum, di mana energi uap bisa dimanfaatkan secara maksimal dengan kerugian yang minimal.

Dari analisis ini, dapat dipahami bahwa menjaga beban generator di sekitar beban menengah sangat penting untuk memaksimalkan efisiensi dan meminimalkan rugi-rugi. Sebaliknya, pembebanan berlebih hanya akan meningkatkan konsumsi energi tanpa diikuti peningkatan output listrik yang sebanding. Temuan ini memberikan gambaran praktis bagi pengoperasian pembangkit listrik berbasis turbin uap di pabrik kelapa sawit: pengendalian beban menjadi kunci utama agar sistem bekerja lebih efisien, andal, dan hemat energi.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian serta analisis yang telah dilakukan mengenai variasi beban terhadap efesiensi output listrik turbin uap,maka dapat ditarik sejumlah kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi beban generator memberikan pengaruh terhadap kinerja turbin uap. Selama enam hari pengamatan, daya masukan (Pin) tercatat berada pada kisaran 525–605 kW, sedangkan daya keluaran (Pout) berada pada kisaran 509,2–536,8 kW. Selisih antara keduanya menunjukkan adanya rugi-rugi energi dalam proses konversi energi uap menjadi energi listrik.
2. Efisiensi pembangkitan listrik berfluktuasi sesuai perubahan beban. Efisiensi tertinggi tercatat sebesar 98,09% pada 24 Juli 2025 saat beban menengah, sementara efisiensi terendah sebesar 84,16% terjadi pada 28 Juli 2025 saat beban tinggi. Hal ini menegaskan bahwa beban menengah lebih optimal dalam menghasilkan efisiensi dibandingkan beban rendah maupun tinggi.
3. Rugi-rugi memengaruhi perbedaan daya input dan output. Selama pengamatan, rugi-rugi daya berkisar antara 10.4 kW hingga 95.8 kW. Kehilangan daya ini muncul akibat faktor mekanis pada turbin, rugi panas pada aliran uap, serta rugi daya listrik pada generator. Kondisi tersebut menjelaskan mengapa peningkatan daya masukan tidak selalu menghasilkan peningkatan daya keluaran yang sebanding.
4. Secara keseluruhan, kinerja terbaik tercapai pada beban menengah. Pada kondisi ini, energi uap dapat dimanfaatkan lebih maksimal, rugi-rugi energi relatif kecil, dan efisiensi berada pada nilai yang paling tinggi. Sebaliknya, ketika beban meningkat terlalu tinggi, efisiensi menurun cukup signifikan karena sistem tidak mampu mengonversi energi secara optimal dengan standar pemakaian steam di bar 19 di PKS PTPN IV Berangir..

5.2 Saran

1. Pengoperasian generator sebaiknya diprioritaskan pada beban menengah**.**Dengan demikian, efisiensi sistem dapat tetap tinggi, energi uap dapat dimanfaatkan secara lebih maksimal, serta kerugian energi dapat ditekan seminimal mungkin.
2. Operator perlu memperhatikan batas maksimal pembebanan turbin uap.Meskipun peningkatan beban terlihat menjanjikan, hal tersebut tidak selalu menghasilkan peningkatan daya keluaran yang signifikan. Sebaliknya, pembebanan yang berlebihan justru menurunkan efisiensi sehingga perlu dikendalikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

Annisa, A., Winarso, W., & Dwiono, W. (2019). Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Karakteristik Generator Sinkron. *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*, *1*(1), 37–53. https://doi.org/10.30595/jrre.v1i1.4928

Apouw, A. A., & Mangindaan, G. M. C. and R. (2023). *Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Generator* . 1–6.

Azis H, A., Nauli Lubis, R., Amelia, A., Cholish, & Abdullah. (2024). Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efesiensi Generator Kapasitas 12 Mw Dengan Metode Trial and Error Di Pt Permata Hijau Palm Oleo Belawan. *Jurnal Teknik Elektro*, *6*(2), 95–99.

Danial, Kurniawan, E., & Samosir, R. (2019). Analisa Efisiensi Isentropik Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (Pltbm). *Jurnal Teknik Mesin*, *II*(3), 84–91.

Indonesia, P., Furqon, M. C. Al, Elektro, T., & Sinkron, G. (2025). *EFFECT OF CHANGES IN SYNCHRONOUS GENERATOR LOAD ON THE EXCITATION SYSTEM CASE STUDY OF PT . PLN INDONESIA POWER UPK PLTA MANINJAU PENGARUH PERUBAHAN BEBAN GENERATOR SINKRON TERHADAP SISTEM EKSITASI STUDI KASUS PT . PLN.* *4*(December), 91–98.

Indonesia, P. T., & Semarang, P. (2020). Pengaruh Variasi Beban Terhadap Efisiensi High Pressure System Heat Recovery Steam Generator 2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Gas Dan Uap Tambak Lorok Pt. Indonesia Power Semarang Pgu. *Prosiding Seminar Nasional NCIET*, *1*(1), 312–316. https://doi.org/10.32497/nciet.v1i1.120

Lubis, S. (2018). Analisa Tegangan Keluaran Alternator Mobil Sebagai Pembangkit Energi Listrik Alternatif. *RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro*, *1*(1), 44–47. https://doi.org/10.30596/rele.v1i1.2270

Manangka, R., Mangindaan, G. C., & Tumaliang, H. (2022). Analisa Pengaruh Perubahan Beban terhadap Efisiensi Generator Sinkron 3 Fasa di PLTP Lahendong Unit 3. *Jurnal Teknik Elektro Universitas Sam Ratulang*, 1–7.

Mariono, P., Palilingan, R. N., & Sompotan, A. F. (2022). Pengaruh Perubahan Temperatur Lingkungan Terhadap Kinerja Dan Efisiensi Turbin Pada

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (Pltp) Unit 2 Lahendong. *Jurnal FisTa : Fisika Dan Terapannya*, *3*(2), 48–51. https://doi.org/10.53682/fista.v3i2.214

Muharrir, M., & Hajar, I. (2019). Analisis Pengaruh Beban Terhadap Efisiensi Generator Unit 2 PLTP PT. Indonesia Power UPJP Kamojang. *Kilat*, *8*(2), 93–102. https://doi.org/10.33322/kilat.v8i2.643

Muna, Z., Syahputra, Fauzan, & Julianto. (2023). Studi Perubahan Beban Terhadap Tugi-Rugi Daya Outpur Generator Sinkron Tiga Phase 20 MW Pada Generator Turbin Gas Unit 2 Pada PT Pupuk Iskandar Muda. *Jurnal Tektro*, *7*(1), 112–117.

Nasution, E. S., & Hasibuan, A. (2018). Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Phasa Dengan Merubah Frekuensi Menggunakan Inverter ALTIVAR 12P. *Sisfo: Jurnal Ilmiah Sistem Informasi*, *2*(1), 25–34. https://doi.org/10.29103/sisfo.v2i1.1001

Nur, A. ., Karim, S. ., & Harsul. (2022). Pengaruh Perubahan Bebaan Generator Terhadap Efisiensi PLTU (Studi pada PLTU Semen Tonasa Unit 35 MW). *Media Elektrik*, *20*(1), 62–66.

Nurotusholihah, F., & Ramdani, S. D. (2017). Pengaruh Pemotongan Blade Terhadap Performa Low Pressure Steam Turbine the Influence of Blade Cutting To Performance Low Pressure Steam Turbine. *39 | VANOS Journal Of Mechanical Engineering Education*, *2*(1), 39–46. http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/vanos

Pangkung, A., Nawir, H., & Santoso, A. N. A. (2021). Analisis Pengaruh Perubahan Beban Generator Terhadap Efsiensi Kinerja PLTU Bosowa Energi Jeneponto Unit 2. *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, *18*(2), 241–250. https://doi.org/10.31963/sinergi.v18i2.2691

Pasaribu, F. I., Harahap, P., & Adam, M. (2020). The Design of Energy Storage Circuits for Efficient Use of Electric Power on Computer Devices. *Budapest International Research in Exact Sciences (BirEx)Journal*, *2*(3), 368–375.

Sagita Firza Nur, & I Gede Eka Lesmana. (2021). Analisis Pengaruh Turbine Washing Terhadap Efisiensi dan Daya Pembangkit Turbin Uap. *Jurnal Asiimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa & Inovasi*, *3*, 79–88.

https://doi.org/10.35814/asiimetrik.v3i2.2094

Sahid, Agus H., D. (2014). Analisa Heat Rate Dengan Variasi Beban Pada Pltu Paiton Baru (Unit 9). *EKSERGI Jurnal Teknik Energi*, *10*(1), 23–28.

Sinaga, H. P. I., Utomo, C. T., & Tarigan, E. (2022). Analisis Performansi Turbin Uap Kapasitas 1,95 Mw Di Pt Perkebunan Lembah Bhakti Astra Agro Lestari Tbk. *SINERGI POLMED: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, *3*(1), 23–33. https://doi.org/10.51510/sinergipolmed.v3i1.703

SUGANDI, B., ATABIQ, F., & ASTI, R. A. (2023). Pengaruh Beban Gas Turbine Generator terhadap Efisiensi Heat Recovery Steam Generator pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU). *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, *11*(3), 639. https://doi.org/10.26760/elkomika.v11i3.639

Suriaman, I., & Suprayitno, A. (2022). Analisis Pengaruh Laju Uap Terhadap Efisiensi Turbin Uap Condensing Pada Pltu Pt. Xxx. *Jurnal Teknologika*, *12*(2), 205–215. https://jurnal.wastukancana.ac.id/index.php/teknologika/article/view/235%0Ahttps://jurnal.wastukancana.ac.id/index.php/teknologika/article/download/235/122

Suwarno, S., & Zambak, F. (2022). … Motor Listrik Sebagai Beban Pada PLTS 5 kWp (Aplikasi: Laboratorium Balai Besar Pengembangan Dan Penjamin Mutu Pendidikan Vokasi Bidang Bangunan Dan …. *RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi)* …. http://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RELE/article/view/10784

Wijaya, A. K., Nugroho, D., & Nugroho, A. A. (2022). Analisa Efisiensi Kinerja Generator G-101 Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi. *TRANSISTOR: Jurnal Elektro Dan Informatika*, *4*(1), 43–48.

Wulandari, P. F., Lutfiananda, D., & Sumada, K. (2023). Unjuk Kerja Dan Efisiensi Turbin Uap Dan Generator (Tg-65) Pada Pembangkit Listrik Unit Sistem Utilitas Departemen Produksi Iiia Pt Petrokimia Gresik. *SINERGI POLMED: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, *4*(1), 67–74. https://doi.org/10.51510/sinergipolmed.v4i1.1036

LAMPIRAN
DAFTAR RIWAYAT HIDUP

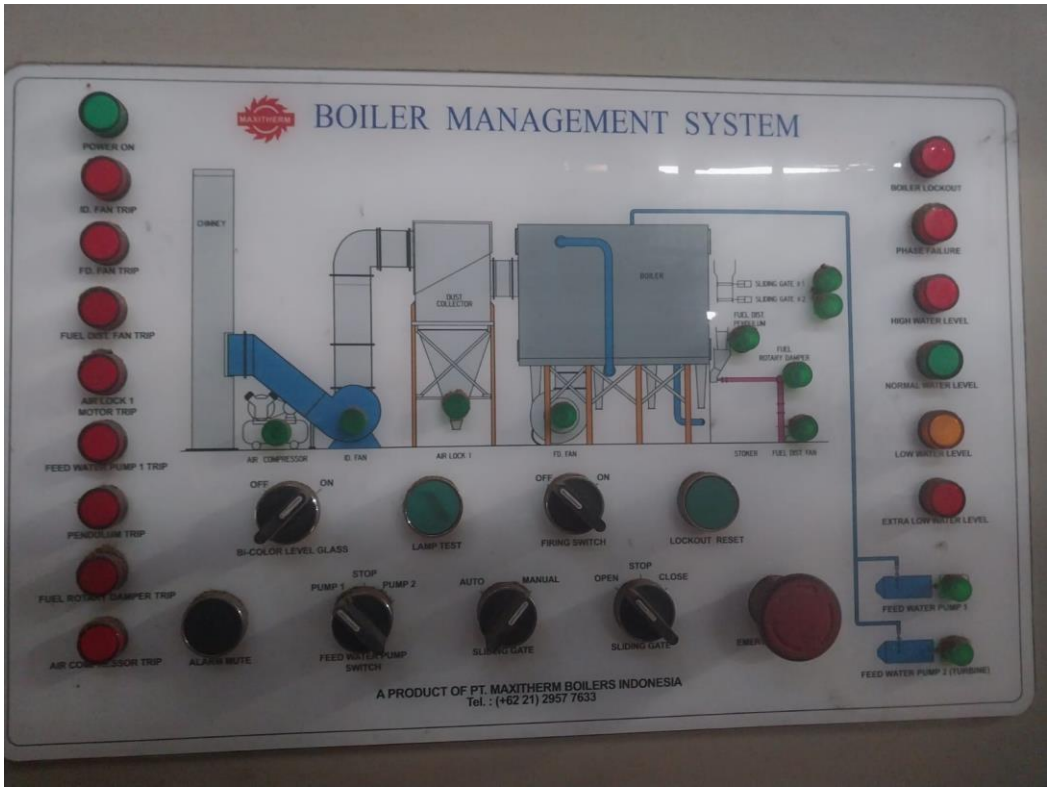
A. Identitas Diri

Nama Lengkap	: Ragil Rean Wijaya
Tempat/Tangal Lahir	: Medan, 10 Juni 2002
Alamat	: Jl.Melati,Gg.Cemara No.108,Dumai,Riau
Jenis Kelamin	: Laki-laki
Umur	23
Agama	: Islam
Kewarganegaraan	: Indonesia
Status	: Belum Menikah
Tinggi/Berat	: 170 / 60
E-mail	: ragilrean1@gmail.com
Nomor Telepon/HP	082386268609

B. Riwayat Pendidikan

Tahun 2008 - 2014	: SD. Negeri 004 Teluk Binjai,Dumai
Tahun 2014 - 2017	: SMP. Negeri Binaan Khusus,Dumai
Tahun 2017 - 2020	: SMK. Negeri 2 Dumai
Tahun 2021 - 2025	: Universitas Muhammadiyah Sumatra Utara

GEN TURBIN 2
50.0
Hz


BOILER MANAGEMENT SYSTEM
POWER ON
ID. FAN TRIP
FD. FAN TRIP
FUEL DIST. FAN TRIP
AIR LOCK 1 MOTOR TRIP
FEED WATER PUMP 1 TRIP
PENDULUM TRIP
FUEL ROTARY DAMPER TRIP
AIR COMPRESSOR TRIP
BOILER LOCKOUT
PHASE FAILURE
HIGH WATER LEVEL
NORMAL WATER LEVEL
LOW WATER LEVEL
EXTRA LOW WATER LEVEL
FEED WATER PUMP 1
FEED WATER PUMP 2 (TURBINE)
CHIMNEY
DUST COLLECTOR
BOILER
SLIDING GATE # 1
SLIDING GATE # 2
FUEL DIST PENDULUM
FUEL ROTARY DAMPER
AIR COMPRESSOR
ID. FAN
AIR LOCK 1
FD. FAN
STOKER
FUEL DIST FAN
OFF
ON
BI-COLOR LEVEL GLASS
LAMP TEST
FIRING SWITCH
LOCKOUT RESET
STOP
PUMP 1
PUMP 2
AUTO
MANUAL
OPEN
CLOSE
ALARM MUTE
FEED WATER PUMP SWITCH
SLIDING GATE
A PRODUCT OF PT. MAXITHERM BOILERS INDONESIA
Tel. : (+62 21) 2957 7633

0.00
0.00
Power
Valve Open
Valve Close
Valve Open
Valve Close
Open
Close
Open
Close

UNIT PKS BERANGIR
PT PERKEBUNAN NUSANTARA IV
LABURA – SUMATERA UTARA – INDONESIA

- KANTOR UNIT USAHA	:	BERANGIR	TELP	:	(0624) 7001410
- KANTOR PUSAT	:	JL. LETJEND SUPRAPTO NO.2 MEDAN	TELP	:	(061) 45154666 – FAX (061) 4573117

Nomor : 2PBR/X/93/VII/2025 PKS Berangir, 24 Juli 2025
Lamp :
Hal : **Izin Riset**

KepadaYth :
Bapak/ Ibu Rektor UMSU
Di-
Medan

Sesuai dengan surat dari UMSU Medan No. 1160/II.3.AU/UMSU-07/B/2025 pada tanggal 23 Juli 2025 Perihal Permohonan Izin Riset, dengan ini **diizinkan** untuk riset di PTPN IV Regional II PKS Berangir dari tanggal 25 Juli 2025- 30 Juli 2025 dengan mematuhi peraturan yang berlaku di perusahaan PTPN IV Regional II PKS Berangir. Selama Riset di PKS Berangir harus memakai APD lengkap, resiko kecelakaan selama Riset ditanggung mahasiswa itu sendiri.

Demikian disampaikan dan terimakasih.

PT PERKEBUNAN NUSANTARA IV
UNIT PKS BERANGIR

Dolly Juanito
Manajer

Tebusan:
-Arsip

AKHLAK – Amanah, Kompeten, Harmonis, Loyal, Adaptif, Kolaboratif

R E L E
(Rekayasa Elektrikal dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro
Vol. 2, No. 1, Oktober 2025, ISSN 2622 – 7002

ANALISIS PENGARUH VARIASI BEBAN GENERATOR TERHADAP EFISIENSI OUTPUT LISTRIK TURBIN UAP

Ragil Rean Wijaya[1], Elvy Sahnur NST[2], dan Faisal Irsan Pasaribu [3]
[1,2] Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara[1], Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara[2]
Jl. Kapten Muchtar Basri,BA No. 03 Kode pos 20238[1]
Jl. Kapten Muchtar Basri,BA No. 03 Kode pos 20238[2]
[3]Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara[3] (afiliasi)
Jl. Kapten Muchtar Basri,BA No. 03 Kode pos 20238 [3]
e-mail: ragilrean1@gmail.com

Abstrak — Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat menuntut sistem pembangkitan yang mampu bekerja dengan andal dan efisien. Pabrik kelapa sawit sebagai salah satu pengguna turbin uap dituntut mengoptimalkan kinerja generator agar rugi-rugi daya dapat ditekan. Variasi beban generator diketahui berpengaruh terhadap stabilitas tegangan serta efisiensi konversi energi uap menjadi energi listrik. Oleh karena itu, diperlukan analisis lebih lanjut mengenai hubungan variasi beban dengan efisiensi keluaran listrik.Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi beban generator terhadap output listrik turbin uap serta mengidentifikasi kondisi beban yang menghasilkan efisiensi optimal. Metode penelitian dilakukan secara kuantitatif dengan pengumpulan data lapangan di PTPN IV Unit PKS Berangir selama enam hari berturut-turut (23–28 Juli 2025). Data yang dicatat mencakup daya masukan turbin (Pin) berdasarkan perhitungan laju massa uap dan entalpi, serta daya keluaran generator (Pout) dari pengukuran sistem tiga fasa. Efisiensi dihitung melalui perbandingan Pout dengan Pin.Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi beban generator berpengaruh signifikan terhadap efisiensi sistem. Nilai efisiensi berfluktuasi pada rentang 84,16% hingga 98,09%. Efisiensi tertinggi dicapai pada beban menengah (98,09%), sedangkan efisiensi terendah terjadi pada beban tinggi (84,16%). Selisih antara daya masukan dan keluaran menunjukkan rugi-rugi energi berkisar 10,4–95,8 kW, yang bersumber dari faktor mekanis, panas, dan kelistrikan. Kesimpulannya, beban menengah menjadi kondisi paling optimal dalam menjaga efisiensi tinggi dan meminimalkan rugi-rugi daya pada turbin uap.

Kata kunci : Turbin Uap, Variasi Beban Generator, Efisiensi Pembangkitan Listrik, Rugi-Rugi Daya.

Abstract—*The increasing demand for electrical energy requires power generation systems that operate reliably and efficiently. Palm oil mills, as one of the industries utilizing steam turbines, must optimize generator performance in order to minimize power losses. Variations in generator load are known to affect voltage stability as well as the efficiency of converting steam energy into electrical energy. Therefore, further analysis is needed to examine the relationship between load variations and electrical output efficiency.This study aims to analyze the effect of generator load variations on the electrical output of a steam turbine and to identify load conditions that produce optimal efficiency. The research applied a quantitative method through field data collection at PTPN IV Unit PKS Berangir over six consecutive days (July 23–28, 2025). The recorded data included turbine input power (Pin), calculated from steam mass flow and enthalpy difference, and generator output power (Pout), measured using a three-phase system. Efficiency was determined by comparing Pout with Pin.The results indicate that generator load variations significantly affect system efficiency. Efficiency values fluctuated between 84.16% and 98.09%. The highest efficiency was achieved at medium load (98.09%), while the lowest occurred at high load (84.16%). The difference between input and output power showed energy losses ranging from 10.4 to 95.8 kW, originating from mechanical, thermal, and electrical factors. In conclusion, medium load conditions are most optimal for maintaining high efficiency and minimizing power losses in steam turbine operations.*

Keywords : *Steam Turbine, Generator Load Variation, Power Generation Efficiency, Power Losses.*

Copyright© 2020 RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro. This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

ISSN 2622 – 7002 (online), Hal ___– __, DOI: https://doi.org/10.30596/rele.v1i1.____

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi yang terus meningkat menjadikan energi sebagai faktor penting dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, karena hampir seluruh aktivitas manusia memerlukan energi untuk menunjang berbagai proses dan kegiatan. Salah satu bentuk energi yang paling vital adalah energi listrik (Sahid, Agus H., 2014). Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, digunakan sistem pembangkit yang mampu mengubah energi mekanis menjadi energi listrik, seperti turbin uap yang berfungsi mengonversi energi panas menjadi energi mekanis berupa putaran poros turbin (Nurotusholihah & Ramdani, 2017; Sagita Firza Nur & I Gede Eka Lesmana, 2021). Energi mekanis tersebut selanjutnya diubah menjadi energi listrik melalui generator sinkron, yang beroperasi secara kontinu sesuai kebutuhan beban (Azis H. et al., 2024). Perubahan beban pada generator dapat memengaruhi kestabilan tegangan dan efisiensi sistem pembangkitan, karena tegangan keluaran bergantung pada arus eksitasi yang menguatkan medan magnet generator (P. Indonesia et al., 2025). Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis variasi beban generator terhadap output listrik turbin uap serta mengidentifikasi efisiensi pembangkitan listrik saat terjadi perubahan beban. Penelitian dibatasi pada sistem pembangkit listrik berbasis turbin uap di pabrik kelapa sawit dengan fokus pada parameter beban generator, daya input-output, dan efisiensi tanpa membahas faktor non-teknis seperti biaya atau aspek lingkungan. Hasil penelitian diharapkan dapat menambah wawasan mengenai pengaruh variasi beban terhadap efisiensi pembangkitan listrik, memberikan rekomendasi operasional bagi operator pembangkit untuk mengoptimalkan beban generator, serta meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pembangkitan listrik berbasis turbin uap.

II. STUDI PUSTAKA

Beberapa penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan pengaruh perubahan beban terhadap efisiensi generator telah banyak dilakukan. Penelitian berjudul "Analisa Pengaruh Perubahan Beban terhadap Efisiensi Generator Sinkron 3 Fasa di PLTP Lahendong Unit 3" bertujuan untuk menganalisis apakah generator masih dalam kondisi optimal atau tidak. Berdasarkan data operasi selama satu bulan, diperoleh bahwa beban terendah 12 MW memiliki efisiensi 56% sedangkan beban tertinggi 19 MW mencapai efisiensi 88%, menunjukkan bahwa besarnya beban berpengaruh terhadap efisiensi generator (Manangka et al., 2022). Penelitian lain berjudul "Analisis Pengaruh Perubahan Beban Generator Terhadap Efisiensi Kinerja PLTU Bosowa Energi Jeneponto Unit 2" menunjukkan bahwa efisiensi tertinggi terjadi pada beban 90 MW sebesar 55,68% dan efisiensi terendah pada beban 64,98 MW sebesar 22,69%, sehingga perubahan beban berpengaruh signifikan terhadap efisiensi pembangkit (Pangkung et al., 2021). Selanjutnya, penelitian "Pengaruh Beban Gas Turbine Generator terhadap Efisiensi Heat Recovery Steam Generator pada PLTGU" menunjukkan efisiensi rata-rata HRSG sebesar 65% dengan efisiensi tertinggi 75,14% pada beban 25.957 kW dan efisiensi terendah 56,77% pada beban 30.127 kW, dengan korelasi negatif kuat (r = –0,7) antara beban dan efisiensi (Sugandi et al., 2023). Penelitian "Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Karakteristik Generator Sinkron" di PT Sumber Segara Primadaya menemukan efisiensi generator berada pada rentang 97,12–98,73%, menandakan performa yang baik dengan rugi-rugi maksimal 2,88% (Annisa et al., 2019). Sementara itu, penelitian "Pengaruh Perubahan Beban Generator Terhadap Efisiensi PLTU (Studi pada PLTU Semen Tonasa Unit 35 MW)" menunjukkan efisiensi sebelum perubahan beban sebesar 97,4% dan setelah perubahan beban turun menjadi 84,68%, menandakan bahwa efisiensi berbanding terbalik dengan peningkatan beban (Nur et al., 2022). Hasil serupa juga ditemukan dalam penelitian "Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Generator", di mana beban terendah 15 MW memiliki efisiensi 57,68% dan beban tertinggi 20 MW mencapai efisiensi 98,79%, memperkuat hubungan antara besarnya beban dan efisiensi generator (Apouw & Mangindaan, 2023). Penelitian "Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Generator Kapasitas 12 MW dengan Metode Trial and Error di PT Permata Hijau Palm Oleo Belawan" menunjukkan efisiensi berkisar antara 89,14% hingga 96,26%, dengan rugi maksimum 10,45%, yang menandakan sistem masih efisien (Azis H. et al., 2024). Sementara itu, penelitian "Analisa Heat Rate dengan Variasi Beban pada PLTU Paiton Baru (Unit 9)" menghasilkan heat rate terendah 2416,22 kcal/kWh pada beban 659 MW, dengan konsumsi batubara spesifik 0,572 kg/kWh dan biaya produksi listrik 400,32 Rp/kWh, menunjukkan bahwa semakin kecil heat rate maka semakin tinggi efisiensi dan semakin rendah biaya produksi (Sahid, Agus H., 2014). Selain itu, penelitian "Pengaruh Variasi Beban Terhadap Efisiensi High Pressure System Heat Recovery Steam Generator 2.3 PLTGU Tambak Lorok PT Indonesia Power Semarang PGU" menemukan bahwa efisiensi meningkat seiring dengan bertambahnya beban gas turbine, dengan efisiensi 48,19% pada beban 70 MW dan 52,07% pada beban 90 MW (P. T. Indonesia & Semarang, 2020). Terakhir, penelitian "Pengaruh Perubahan Beban Generator Sinkron terhadap Sistem Eksitasi (Studi Kasus PT PLN Indonesia Power UPK PLTA Maninjau)" menunjukkan bahwa perubahan beban generator memengaruhi nilai arus eksitasi yang

Copyright© 2020 RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro. This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

diinjeksikan, di mana beban rendah 10,4 MW memiliki arus eksitasi 8 A dan beban tinggi 16,5 MW memiliki arus eksitasi lebih besar, menandakan hubungan erat antara beban, arus eksitasi, dan tegangan keluaran generator (P. Indonesia et al., 2025).

III. METODE

Pada penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan Menganalisis Efesiensi generator Turbin uap pada bulan Juli 2025 bertempatan di PTPN IV UNIT PKS BERANGIR,Jl. Jalinsum, Simpang Marbau, Kec. Na IX-X, Kabupaten Labuhanbatu Utara, Adapun langkah-langkah yang harus dilakukan dan diketahui penelitian dalam pelaksanaan tugas akhir ini yaitu sebagai berikut:

1. Menyiapkan alat dan bahan penelitian
2. Mengambil data Laju Aliran Massa Uap,Tekanan Uap Masuk,Tekanan Uap Keluar,Arus,Tegangan,Faktor Daya,Daya Output Generator.
3. Melakukan input data Software Microsoft Excel
4. Melakukan perhitungan dan analisis data
5. Melakukan analisis dan evaluasi hasil data efesiensi daya pada beban generator turbin uap.
6. Mengambil kesimpulan dari hasil analisis yang telah di laksanakan.

a. Persamaan

Kebutuhan energi yang terus meningkat menjadikan energi listrik sangat vital bagi aktivitas manusia (Sahid, Agus H., 2014). Pembangkit listrik tenaga uap memanfaatkan energi panas menjadi energi mekanis melalui turbin, kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator sinkron (Nurotusholihah & Ramdani, 2017; Sagita Firza Nur & Lesmana, 2021). Daya turbin dihitung menggunakan rumus:

$$\eta = \frac{Waktual}{Wis} \; x \; 100\% \; \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

Perubahan beban pada generator memengaruhi kestabilan tegangan dan efisiensi sistem karena tegangan keluaran bergantung pada arus eksitasi (P. Indonesia et al., 2025). Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi beban generator terhadap output listrik dan efisiensi turbin uap. Fokus penelitian pada parameter beban generator, daya input-output, serta efisiensi pembangkitan tanpa membahas faktor non-teknis. Hasil diharapkan memberikan rekomendasi operasional untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pembangkitan listrik berbasis turbin uap.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data penelitian diperoleh dari pengukuran langsung pada sistem pembangkit listrik tenaga uap di PTPN IV Unit PKS Berangir selama 6 hari berturut-turut (23–28 Juli 2025) dengan variasi parameter seperti tekanan inlet, tekanan exhaust (BPV), steam flow, entalpi masuk dan keluar, suhu, tegangan, arus, serta daya keluaran.

Berdasarkan Tabel 4.1, tekanan uap masuk berkisar 18–20 bar dan suhu keluaran 120–126 °C. Nilai entalpi masuk (hin) antara 2794–2797 kJ/kg, sedangkan entalpi keluar (hout) sekitar 2706–2714 kJ/kg. Laju aliran uap meningkat dari 23,78 menjadi 24,28 ton/jam seiring kenaikan beban. Tegangan generator dijaga konstan 380 V, sedangkan arus dan daya bervariasi dari 790–846 A dan 509,2–536,8 kW. Faktor daya (cos φ) stabil di 0,85.

NO	Tekanan (Bar)	Entalpy In (Kj/Kg)	Steam Flow (Tbs/h)	Exhaust (Bar)	Entalpy out (Kj/Kg)	Temperatur (C)	Tegangan (V)	Arus (A)	Pout (Kw)	Cos q
1	18	2794.81	23.78	2.2	2710.6	123.27	380	846	536.8	0.85
2	19	2796.09	24.168	2.4	2714.55	126.09	380	842	536.8	0.85
3	20	2797.21	24.126	2.2	2710.6	123.27	380	831.4	524.8	0.85
4	19	2796.09	24.24	2.2	2710.6	123.27	380	848	533.6	0.85
5	19	2796.09	24.26	2.6	2796.09	128.73	380	814	512.8	0.85
6	19	2796.09	24.28	2	2706.29	120.23	380	790	509.2	0.85

Daya masukan (Pin) generator berasal dari energi mekanis turbin uap yang mengubah energi panas uap menjadi tenaga putar untuk menggerakkan poros generator. Perhitungan Pin mengacu pada data pengukuran tanggal 23–27 Juli 2025 (Tabel 4.1), dengan kondisi uap saturated agar energi yang diterima turbin optimal.

Daya keluaran (Pout) dihitung dari beban listrik yang digunakan pabrik. Semakin besar beban, semakin tinggi daya listrik yang dihasilkan. Namun, dalam proses konversi energi dari turbin ke generator selalu terjadi rugi-rugi energi, yang dibedakan menjadi dua jenis, yaitu:

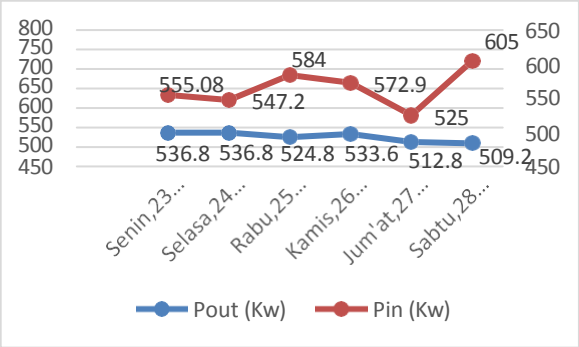
Rugi daya, yaitu kehilangan energi per satuan waktu (W atau kW), misalnya akibat panas pada lilitan generator, gesekan poros, atau rugi inti.

Rugi energi, yaitu akumulasi rugi daya selama waktu operasi (J atau kWh). Contohnya, rugi daya 5 kW selama 2 jam menghasilkan rugi energi 10 kWh.

Perbedaan antara Pin dan Pout pada setiap pengukuran mencerminkan besarnya rugi-rugi tersebut dalam sistem pembangkitan.

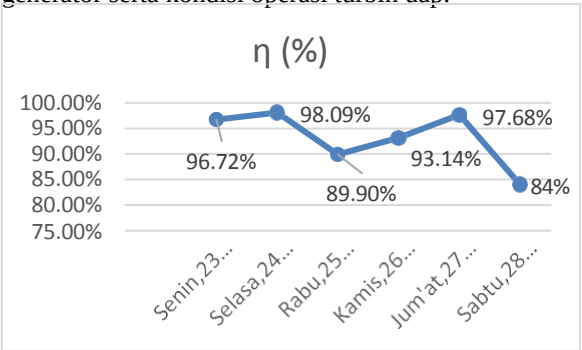
Copyright© 2020 RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro. This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

ISSN 2622 – 7002 (online), Hal ___– __, DOI: https://doi.org/10.30596/rele.v1i1.____



Berdasarkan Grafik 4.1, terlihat bahwa daya masukan (Pin) selalu lebih besar dibandingkan daya keluaran (Pout) selama periode 23–28 Juli 2025. Pada awal pengamatan, Pin sebesar 555,08 kW dengan Pout 536,8 kW, kemudian cenderung stabil hingga 24 Juli. Kenaikan signifikan terjadi pada 25 Juli, di mana Pin mencapai 584 kW sementara Pout menurun menjadi 524,8 kW. Kondisi serupa terlihat pada 28 Juli, saat Pin naik hingga 605 kW namun Pout justru turun ke 509,2 kW.

Secara keseluruhan, Pout relatif stabil di kisaran 509–536 kW, sedangkan Pin berfluktuasi antara 525–605 kW. Perbedaan ini menunjukkan adanya rugi-rugi energi selama proses konversi daya mekanik menjadi listrik, yang dipengaruhi oleh variasi beban generator serta kondisi operasi turbin uap.



Berdasarkan Grafik 4.2, peningkatan variasi beban generator berpengaruh langsung terhadap efisiensi turbin uap. Pada beban rendah, efisiensi masih kecil karena daya keluaran belum sebanding dengan daya input. Seiring kenaikan beban, efisiensi meningkat hingga mencapai titik optimal, menandakan turbin bekerja paling efektif pada beban menengah hingga mendekati nominal. Namun, pada beban tinggi, efisiensi kembali menurun akibat meningkatnya rugi-rugi energi pada sistem turbin, generator, dan distribusi. Dengan demikian, grafik ini menunjukkan adanya titik beban optimum yang menghasilkan efisiensi tertinggi, yang menjadi acuan penting dalam menjaga stabilitas dan keekonomisan operasi turbin uap.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian serta analisis yang telah dilakukan mengenai variasi beban terhadap efesiensi output listrik turbin uap,maka dapat ditarik sejumlah kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi beban generator memberikan pengaruh terhadap kinerja turbin uap. Selama enam hari pengamatan, daya masukan (Pin) tercatat berada pada kisaran 525–605 kW, sedangkan daya keluaran (Pout) berada pada kisaran 509,2–536,8 kW. Selisih antara keduanya menunjukkan adanya rugi-rugi energi dalam proses konversi energi uap menjadi energi listrik.
2. Efisiensi pembangkitan listrik berfluktuasi sesuai perubahan beban. Efisiensi tertinggi tercatat sebesar 98,09% pada 24 Juli 2025 saat beban menengah, sementara efisiensi terendah sebesar 84,16% terjadi pada 28 Juli 2025 saat beban tinggi. Hal ini menegaskan bahwa beban menengah lebih optimal dalam menghasilkan efisiensi dibandingkan beban rendah maupun tinggi.
3. Rugi-rugi memengaruhi perbedaan daya input dan output. Selama pengamatan, rugi-rugi daya berkisar antara 10.4 kW hingga 95.8 kW. Kehilangan daya ini muncul akibat faktor mekanis pada turbin, rugi panas pada aliran uap, serta rugi daya listrik pada generator. Kondisi tersebut menjelaskan mengapa peningkatan daya masukan tidak selalu menghasilkan peningkatan daya keluaran yang sebanding.
4. Secara keseluruhan, kinerja terbaik tercapai pada beban menengah. Pada kondisi ini, energi uap dapat dimanfaatkan lebih maksimal, rugi-rugi energi relatif kecil, dan efisiensi berada pada nilai yang paling tinggi. Sebaliknya, ketika beban meningkat terlalu tinggi, efisiensi menurun cukup signifikan karena sistem tidak mampu mengonversi energi secara optimal dengan standar pemakaian steam di bar 19 di PKS PTPN IV Berangir..

VI SARAN

Pengoperasian generator sebaiknya diprioritaskan pada beban menengah.Dengan demikian, efisiensi sistem dapat tetap tinggi, energi uap dapat dimanfaatkan secara lebih maksimal, serta kerugian energi dapat ditekan seminimal mungkin.

Operator perlu memperhatikan batas maksimal pembebanan turbin uap.Meskipun peningkatan beban terlihat menjanjikan, hal tersebut tidak selalu menghasilkan peningkatan daya keluaran yang signifikan. Sebaliknya, pembebanan yang berlebihan justru menurunkan efisiensi sehingga perlu dikendalikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Annisa, A., Winarso, W., & Dwiono, W. (2019). Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Karakteristik Generator Sinkron. Jurnal Riset

Copyright© 2020 RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro. This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Rekayasa Elektro, 1(1), 37–53. https://doi.org/10.30595/jrre.v1i1.4928
[2] Apouw, A. A., & Mangindaan, G. M. C. and R. (2023). Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Generator . 1–6.
[3] Azis H, A., Nauli Lubis, R., Amelia, A., Cholish, & Abdullah. (2024). Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efesiensi Generator Kapasitas 12 Mw Dengan Metode Trial and Error Di Pt Permata Hijau Palm Oleo Belawan. Jurnal Teknik Elektro, 6(2), 95–99.
[4] Danial, Kurniawan, E., & Samosir, R. (2019). Analisa Efisiensi Isentropik Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (Pltbm). Jurnal Teknik Mesin, II(3), 84–91.
[5] Indonesia, P., Furqon, M. C. Al, Elektro, T., & Sinkron, G. (2025). EFFECT OF CHANGES IN SYNCHRONOUS GENERATOR LOAD ON THE EXCITATION SYSTEM CASE STUDY OF PT . PLN INDONESIA POWER UPK PLTA MANINJAU PENGARUH PERUBAHAN BEBAN GENERATOR SINKRON TERHADAP SISTEM EKSITASI STUDI KASUS PT . PLN. 4(December), 91–98.
[6] Indonesia, P. T., & Semarang, P. (2020). Pengaruh Variasi Beban Terhadap Efisiensi High Pressure System Heat Recovery Steam Generator 2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Gas Dan Uap Tambak Lorok Pt. Indonesia Power Semarang Pgu. Prosiding Seminar Nasional NCIET, 1(1), 312–316. https://doi.org/10.32497/nciet.v1i1.120
[7] Lubis, S. (2018). Analisa Tegangan Keluaran Alternator Mobil Sebagai Pembangkit Energi Listrik Alternatif. RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro, 1(1), 44–47. https://doi.org/10.30596/rele.v1i1.2270
[8] Manangka, R., Mangindaan, G. C., & Tumaliang, H. (2022). Analisa Pengaruh Perubahan Beban terhadap Efisiensi Generator Sinkron 3 Fasa di PLTP Lahendong Unit 3. Jurnal Teknik Elektro Universitas Sam Ratulang, 1–7.
[9] Mariono, P., Palilingan, R. N., & Sompotan, A. F. (2022). Pengaruh Perubahan Temperatur Lingkungan Terhadap Kinerja Dan Efisiensi Turbin Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (Pltp) Unit 2 Lahendong. Jurnal FisTa : Fisika Dan Terapannya, 3(2), 48–51. https://doi.org/10.53682/fista.v3i2.214
[10] Muharrir, M., & Hajar, I. (2019). Analisis Pengaruh Beban Terhadap Efisiensi Generator Unit 2 PLTP PT. Indonesia Power UPJP Kamojang. Kilat, 8(2), 93–102. https://doi.org/10.33322/kilat.v8i2.643
[11] Muna, Z., Syahputra, Fauzan, & Julianto. (2023). Studi Perubahan Beban Terhadap Tugi-Rugi Daya Outpur Generator Sinkron Tiga Phase 20 MW Pada Generator Turbin Gas Unit 2 Pada PT Pupuk Iskandar Muda. Jurnal Tektro, 7(1), 112–117.
[12] Nasution, E. S., & Hasibuan, A. (2018). Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Phasa Dengan Merubah Frekuensi Menggunakan Inverter ALTIVAR 12P. Sisfo: Jurnal Ilmiah Sistem Informasi, 2(1), 25–34. https://doi.org/10.29103/sisfo.v2i1.1001
[13] Nur, A. ., Karim, S. ., & Harsul. (2022). Pengaruh Perubahan Bebaan Generator Terhadap Efisiensi PLTU (Studi pada PLTU Semen Tonasa Unit 35 MW). Media Elektrik, 20(1), 62–66.
[14] Nurotusholihah, F., & Ramdani, S. D. (2017). Pengaruh Pemotongan Blade Terhadap Performa Low Pressure Steam Turbine the Influence of Blade Cutting To Performance Low Pressure Steam Turbine. 39 | VANOS Journal Of Mechanical Engineering Education, 2(1), 39–46. http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/vanos
[15] Pangkung, A., Nawir, H., & Santoso, A. N. A. (2021). Analisis Pengaruh Perubahan Beban Generator Terhadap Efsiensi Kinerja PLTU Bosowa Energi Jeneponto Unit 2. Jurnal Teknik Mesin Sinergi, 18(2), 241–250. https://doi.org/10.31963/sinergi.v18i2.2691
[16] Pasaribu, F. I., Harahap, P., & Adam, M. (2020). The Design of Energy Storage Circuits for Efficient Use of Electric Power on Computer Devices. Budapest International Research in Exact Sciences (BirEx)Journal, 2(3), 368–375.
[17] Sagita Firza Nur, & I Gede Eka Lesmana. (2021). Analisis Pengaruh Turbine Washing Terhadap Efisiensi dan Daya Pembangkit Turbin Uap. Jurnal Asiimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa & Inovasi, 3, 79–88. https://doi.org/10.35814/asiimetrik.v3i2.2094
[18] Sahid, Agus H., D. (2014). Analisa Heat Rate Dengan Variasi Beban Pada Pltu Paiton Baru (Unit 9). EKSERGI Jurnal Teknik Energi, 10(1), 23–28.
[19] Sinaga, H. P. I., Utomo, C. T., & Tarigan, E. (2022). Analisis Performansi Turbin Uap Kapasitas 1,95 Mw Di Pt Perkebunan Lembah Bhakti Astra Agro Lestari Tbk. SINERGI POLMED: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, 3(1), 23–33. https://doi.org/10.51510/sinergipolmed.v3i1.703
[20] SUGANDI, B., ATABIQ, F., & ASTI, R. A. (2023). Pengaruh Beban Gas Turbine Generator terhadap Efisiensi Heat Recovery Steam Generator pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU). ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika, 11(3), 639. https://doi.org/10.26760/elkomika.v11i3.639
[21] Suriaman, I., & Suprayitno, A. (2022). Analisis Pengaruh Laju Uap Terhadap Efisiensi Turbin Uap Condensing Pada Pltu Pt. Xxx. Jurnal Teknologika, 12(2), 205–215. https://jurnal.wastukancana.ac.id/index.php/teknologika/article/view/235%0Ahttps://jurnal.wastukancana.ac.id/index.php/teknologika/article/download/235/122
[22] Suwarno, S., & Zambak, F. (2022). … Motor Listrik Sebagai Beban Pada PLTS 5 kWp (Aplikasi: Laboratorium Balai Besar Pengembangan Dan

Copyright© 2020 RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro. This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

ISSN 2622 – 7002 (online), Hal ___– __, DOI: https://doi.org/10.30596/rele.v1i1.____

Penjamin Mutu Pendidikan Vokasi Bidang Bangunan Dan …. RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi) …. http://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RELE/article/view/10784

[23] Wijaya, A. K., Nugroho, D., & Nugroho, A. A. (2022). Analisa Efisiensi Kinerja Generator G-101 Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi. TRANSISTOR: Jurnal Elektro Dan Informatika, 4(1), 43–48.

Wulandari, P. F., Lutfiananda, D., & Sumada, K. (2023). Unjuk Kerja Dan Efisiensi Turbin Uap Dan Generator (Tg-65) Pada Pembangkit Listrik Unit Sistem Utilitas Departemen Produksi Iiia Pt Petrokimia Gresik. SINERGI POLMED: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, 4(1), 67–74. https://doi.org/10.51510/sinergipolmed.v4i1.1036

Copyright© 2020 RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro. This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).