TUGAS AKHIR
ANALISIS KINERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) DI PT PERKEBUNAN NUSANTARA IV REGIONAL I PABRIK KELAPA SAWIT SEI DAUN LABUHAN BATU SELATAN

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro

Pada Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

DISUSUN OLEH:

DENI ADE AFRRIANSYAH

2207220061



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK

2026

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama	: DENI ADE AFRIANSYAH
NPM	: 2207220061
Program Studi	: Teknik Elektro
Judul Skripsi	: Analisis Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun Labuhan Batu Selatan
Bidang ilmu	: Energi Baru Terbarukan

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, Agustus 2026

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing

Noorly Evalina, S.T., M.T.

Dosen Pembanding I/Penguji	Dosen Pembanding II/Penguji
Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd.	Benny Oktrialdi, S.T., M.T.

Program Studi Teknik Elektro

Ketua,

Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd.

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : DENI ADE AFRIANSYAH

Tempat/Tgl Lahir : EMPLASMEN SEI DAUN, 24 April 2004

NPM : 2207220061

Fakultas : Teknik

Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan tugas akhir saya yang berjudul:

"ANALISIS KINERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) DI PT PERKEBUNAN NUSANTARA IV REGIONAL I PABRIK KELAPA SAWIT SEI DAUN LABUHAN BATU SELATAN"

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, Agustus 2026
Saya yang menyatakan,



DENI ADE AFRIANSYAH

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu sumber energi listrik yang digunakan untuk mendukung kebutuhan operasional pada industri kelapa sawit. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sistem kerja PLTU, menghitung daya listrik yang dihasilkan generator, serta menganalisis kinerja PLTU berdasarkan energi listrik dan faktor beban (*load factor*) di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun Labuhan Batu Selatan. Metode penelitian yang digunakan adalah deskriptif kuantitatif dengan menggunakan data operasional generator berupa tegangan, arus, faktor daya, kapasitas generator, dan waktu operasi. Perhitungan daya aktif generator tiga fasa menggunakan persamaan , sedangkan energi listrik dihitung berdasarkan daya aktif dan waktu operasi. Faktor beban dihitung dengan membandingkan energi listrik yang dihasilkan terhadap kapasitas maksimum generator selama waktu operasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa generator menghasilkan daya aktif sebesar 1.007,35 kW, daya semu sebesar 1.119,27 kVA, dan daya reaktif sebesar 487,87 kVAR. Dengan waktu operasi selama 24 jam, energi listrik yang dihasilkan sebesar 24.176,4 kWh/hari. Berdasarkan kapasitas generator sebesar 1.600 kW, diperoleh faktor beban (*load factor*) sebesar 62,96%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa generator beroperasi pada tingkat pembebanan sebesar 62,96% dari kapasitas maksimumnya dan mampu menghasilkan energi listrik untuk mendukung kebutuhan operasional pabrik.

Kata kunci: PLTU, generator, daya listrik, energi listrik, faktor beban.

ABSTRACT

Steam Power Plant (PLTU) is one of the sources of electrical energy used to support operational needs in the palm oil industry. This study aims to analyze the working system of the Steam Power Plant, determine the electrical power generated by the generator, and analyze the performance of the Steam Power Plant based on electrical energy and load factor at PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Sei Daun Palm Oil Mill, South Labuhanbatu Regency. The research method used was descriptive quantitative by utilizing generator operational data, including voltage, current, power factor, generator capacity, and operating time. The three-phase active power was calculated using the equation , while electrical energy was calculated based on active power and operating time. The load factor was determined by comparing the electrical energy generated with the maximum generator capacity during the operating period. The results showed that the generator produced an active power of 1,007.35 kW, apparent power of 1,119.27 kVA, and reactive power of 487.87 kVAR. With an operating time of 24 hours, the electrical energy generated was 24,176.4 kWh/day. Based on the generator capacity of 1,600 kW, the load factor obtained was 62.96%. These results indicate that the generator operated at a loading level of 62.96% of its maximum capacity and was capable of supplying electrical energy to support the operational needs of the palm oil mill.

Keywords: *Steam Power Plant, generator, electrical power, electrical energy, load factor.*

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيْمِ

Alhamdulillahirabbil'alamin, puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, kesehatan, serta kemudahan yang telah diberikan, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **"ANALISIS KINERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) DI PT PERKEBUNAN NUSANTARA IV REGIONAL I PABRIK KELAPA SAWIT SEI DAUN LABUHAN BATU SELATAN."** Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dukungan, doa, serta motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Akrim, M.Pd., selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
2. Bapak Ir. Ade Faisal, Ph.D., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Affandi, S.T., M.T., selaku Wakil Dekan III Bidang Kemahasiswaan Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Ibu Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara dan selaku Dosen Penguji I yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan pengujian, kritik, saran, serta masukan yang sangat berarti bagi penulis. Terima kasih atas setiap arahan dan ilmu yang diberikan, yang tidak hanya membantu penulis dalam menyempurnakan skripsi ini, tetapi juga menjadi pembelajaran berharga bagi penulis dalam menyelesaikan pendidikan.
5. Bapak Benny Oktorialdi, S.T., M.T., selaku Sekretaris Prodi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara dan selaku Dosen Penguji I yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan pengujian, kritik, saran, serta masukan yang sangat berarti

bagi penulis. Terima kasih atas setiap arahan dan ilmu yang diberikan, yang tidak hanya membantu penulis dalam menyempurnakan skripsi ini, tetapi juga menjadi pembelajaran berharga bagi penulis dalam menyelesaikan pendidikan.

6. Noorly Evalina, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, arahan, masukan, serta motivasi kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini.
7. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Program Studi Teknik Elektro, yang telah memberikan ilmu pengetahuan, pengalaman, serta pembelajaran selama penulis menjalani perkuliahan di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
8. Pihak PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun, yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melakukan penelitian serta membantu dalam memperoleh data yang diperlukan dalam penyusunan skripsi ini.
9. Teristimewa untuk kedua orang tua tercinta, Bapak Juliono Eko Sumarno dan Ibu Nur Leli, yang menjadi sumber kekuatan dan alasan bagi penulis untuk terus berjuang hingga sampai pada tahap ini. Terima kasih atas setiap doa yang tidak pernah putus, kasih sayang, perhatian, pengorbanan, serta dukungan yang diberikan kepada penulis. Tidak ada kata yang cukup untuk menggambarkan betapa besar arti dan jasa Bapak dan Ibu dalam perjalanan pendidikan penulis. Skripsi ini penulis persembahkan sebagai salah satu bentuk kecil dari rasa terima kasih dan cinta penulis kepada Bapak dan Ibu.
10. Kepada adik tercinta, Amanda Unsa Sabrina dan Dinah Suci Oktavia terima kasih atas kasih sayang, perhatian, dukungan, dan semangat yang selalu diberikan kepada penulis. Kehadiranmu menjadi salah satu penyemangat bagi penulis dalam menyelesaikan pendidikan ini.
11. Kepada abang, Dendi Prayugo, S.P., beserta kakak ipar, Dewi Andriani, terima kasih atas kasih sayang, perhatian, dukungan, nasihat, dan semangat yang selalu diberikan kepada penulis selama menjalani pendidikan hingga menyelesaikan skripsi ini. Terima kasih telah menjadi bagian dari keluarga

yang selalu memberikan dukungan dan doa kepada penulis. Kehadiran dan dukungan kalian menjadi salah satu penyemangat bagi penulis dalam menyelesaikan pendidikan ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan dan keterbatasan, baik dari segi penulisan maupun pembahasan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi penyempurnaan skripsi ini.

Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis, pembaca, khususnya mahasiswa Program Studi Teknik Elektro, serta dapat menjadi bahan referensi dan tambahan pengetahuan dalam bidang pembangkitan dan analisis kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap.

وَبَرَكَاتُهُ اللَّهِ وَرَحْمَةُ عَلَيْكُمْ وَالسَّلَامُ

Medan, 27 Agustus 2026

Penulis,

DENI ADE AFRIANSYAH

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI i
DAFTAR GAMBAR vi
DAFTAR TABEL X
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 3
1.4 Batasan Masalah 3
1.5 Manfaat Penelitian 4
1.6 Sistematika Penulisan 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 6
2.1 Tinjauan Pustaka 6
2.2 Landasan Teori 7
2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) 7
2.2.2 Jenis – Jenis PLTU 8
2.2.3 Bahan Bakar PLTU di Pabrik Kelapa Sawit 9
2.2.4 Prinsip Kerja PLTU 10
2.2.5 Komponen Utama PLTU 14
2.2.6 Sistem Kelistrikan PLTU 22
2.2.7 Sistem Distribusi Listrik pada PLTU 23
2.2.8 Karakteristik Beban Listrik pada Industri Kelapa Sawit 28
2.2.9 Keandalan Sistem Pembangkit 30
2.2.10 Pentingnya Keandalan Generator pada PLTU 33
2.2.11 Parameter Keluaran Generator 34
2.2.12 Daya Aktif, Daya Reaktif, dan Daya Semu (Power Triangle) 34
2.2.14 Faktor Daya terhadap Generator 39
2.2.15 Faktor yang Mempengaruhi Kinerja PLTU 40
2.2.16 Kinerja PLTU 41
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 43

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian 43
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian 43
3.1 Objek Penelitian 43
3.4 Jenis dan Sumber Data 44
3.5 Teknik Pengumpulan Data 44
3.6 Alat dan Bahan 44
3.7 Variabel dan Parameter Penelitian 45
3.8 Tahapan Analisis Data 46
3.9 Flowchart Penelitian 46
3.10 Perhitungan Variabel Penelitian 47
3.10.1 Perhitungan Daya Listrik (Daya Aktif) 47
3.10.2 Perhitungan Energi Listrik 47
3.10.3 Perhitungan Load Factor 48
3.11 Teknik Analisis Kinerja PLTU 48
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 49
4.1 Gambaran Umum PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun 49
4.2 Sistem PLTU 52
4.2.1 Bahan Bakar Biomassa (Fiber dan Cangkang) 53
4.2.2 Boiler 53
4.2.3 Turbin Uap 54
4.2.4 Generator 55
4.3 Data Operasional PLTU 56
4.3.1 Data Bahan Bakar Biomassa (Fiber dan Shell) 57
4.3.2 Data Boiler 58
4.3.3 Data Generator 59
4.4 Perhitungan Bahan Bakar Biomassa 60
4.5 Perhitungan Daya Listrik 61
4.5.1 Analisis Faktor Daya Generator 63
4.6 Perhitungan Energi Listrik 64
4.7 Perhitungan Load Factor 64
4.8 Pembahasan 65

4.8.1 Analisis Daya Listrik (Daya Aktif) 65
4.8.2 Analisis Daya Semu 68
4.8.3 Analisis Daya Reaktif 70
4.8.4 Analisis Efisiensi Generator Berdasarkan Power Triangle 73
4.8.4 Analisis Energi Listrik 75
4.8.5 Analisis Faktor Beban (*Load Factor)* 78
4.8.6 Analisis Kinerja Generator 81
4.8.7 Analisis Kinerja Generator 85
4.8.8 Keterkaitan dengan Kondisi Boiler dan Turbin Terhadap Kinerja Generator 88
4.8.9 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu 88
4.8.10 Implikasi terhadap Operasional Pabrik 89
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 90
5.1 Kesimpulan 90
5.2 Saran 91
DAFTAR PUSTAKA 92

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) 8
Gambar 2. 2 Fiber (Serabut Kelapa Sawit) 10
Gambar 2. 3 Palm Kernel Shell (Cangkang) 10
Gambar 2. 4 Diagram Alir Proses Kerja PLTU 11
Gambar 2. 5 Siklus Rainkine 13
Gambar 2. 6 Boiler 15
Gambar 2. 7 Turbin Uap 15
Gambar 2. 8 Generator 17
Gambar 2. 9 Generator Sinkron Tipe Salient Pole 18
Gambar 2. 10 Generator Sinkron Tipe Cylindrical Rotor 19
Gambar 2. 11 Diagram PLTU 28
Gambar 2. 12 Segitiga Daya (Power Triangle) 35
Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian 47
Gambar 4. 1 Diagram Alur Proses Pembangkitan Energi Listrik pada PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun 51
Gambar 4. 2 Boiler PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun 54
Gambar 4. 3 Turbin Uap PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun 55
Gambar 4. 4 Generator PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun 56
Gambar 4. 5 Segitiga Daya (Power Triangle) 62

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Salient Pole dan Cylindrical Rotor 19
Tabel 3. 2 Alat Penelitian 44
Tabel 3. 3 Bahan Penelitian..... 45
Tabel 4. 1 Spesifikasi Bahan Bakar Biomassa 53
Tabel 4. 2 Spesifikasi Boiler Sistem PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun 53
Tabel 4. 3 Spesifikasi Turbin Uap Sistem PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun..... 54
Tabel 4. 4 Spesifikasi Generator Sistem PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun..... 55
Tabel 4. 5 Data Bahan Bakar Biomassa (Fiber dan Shell)..... 57
Tabel 4. 6 Data Boiler 58
Tabel 4. 7 Data Generator 59
Tabel 4. 8 Perhitungan Bahan Bakar Biomassa 60

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan teknologi dan pertumbuhan sektor industri, kebutuhan energi listrik mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan utama dalam menunjang aktivitas industri, baik sebagai sumber tenaga penggerak peralatan produksi maupun sebagai pendukung sistem operasional lainnya. Oleh karena itu, ketersediaan energi listrik yang andal dan berkelanjutan menjadi faktor penting dalam menjaga kelangsungan proses produksi industri (Sapta & Umiyati, 2024).

Dalam dunia industri, sistem pembangkit listrik memiliki peranan yang sangat vital untuk menjamin kontinuitas operasional. Banyak industri berskala besar menggunakan pembangkit listrik sendiri (*captive power plant*) guna mengurangi ketergantungan terhadap pasokan listrik dari jaringan umum serta meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem kelistrikan yang digunakan (Liu et al., 2024).

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang banyak diterapkan di sektor industri karena mampu menghasilkan daya listrik dalam jumlah besar dengan biaya operasional yang relatif ekonomis. PLTU bekerja melalui siklus konversi energi, yaitu energi kimia dari bahan bakar diubah menjadi energi panas di boiler, kemudian menjadi energi mekanik pada turbin uap, dan selanjutnya dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator Husain et al., (2024).

Pada industri kelapa sawit, PLTU umumnya memanfaatkan limbah hasil produksi seperti serat (*fiber*) dan cangkang (*shell*) sebagai bahan bakar boiler. Pemanfaatan limbah tersebut tidak hanya dapat mengurangi biaya operasional, tetapi juga mendukung konsep energi terbarukan serta pengelolaan limbah industri yang lebih ramah lingkungan. Salah satu perusahaan yang menerapkan sistem PLTU adalah PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun yang berlokasi di Kabupaten Labuhan Batu Selatan.

PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar biomassa

untuk memenuhi kebutuhan listrik internal pabrik. Pada sistem tersebut, generator berfungsi mengubah energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik yang selanjutnya didistribusikan ke seluruh peralatan produksi. Oleh karena itu, kinerja generator menjadi faktor penting dalam menjamin kontinuitas proses produksi pabrik.

Dalam operasionalnya, kemampuan generator dalam menghasilkan energi listrik perlu dievaluasi secara berkala untuk memastikan bahwa daya listrik yang dihasilkan mampu memenuhi kebutuhan operasional pabrik. Perubahan beban listrik, kondisi operasi, maupun karakteristik pemakaian energi dapat memengaruhi besarnya daya keluaran generator serta tingkat pemanfaatan kapasitas pembangkit. Oleh karena itu, diperlukan analisis terhadap parameter keluaran generator agar kinerja PLTU dapat diketahui berdasarkan kondisi operasional sebenarnya.

Analisis kinerja PLTU bertujuan untuk mengetahui sejauh mana pembangkit bekerja sesuai dengan fungsi dan parameter operasional yang ditetapkan. Dalam penelitian ini, evaluasi dilakukan melalui analisis daya listrik, energi listrik, dan faktor beban (load factor). Ketiga parameter tersebut merupakan indikator yang menggambarkan kemampuan generator dalam menghasilkan energi listrik serta tingkat pemanfaatan kapasitas pembangkit. Hasil analisis diharapkan dapat menjadi bahan evaluasi dalam menjaga keandalan sistem pembangkitan listrik di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun.

Berdasarkan kondisi tersebut, penulis tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul **"Analisis Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun Labuhan Batu Selatan."**

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana sistem kerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang di gunakan di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun?
2. Berapa besar daya listrik yang dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dalam mendukung kebutuhan operasional pabrik?
3. Bagaimana kinerja PLTU berdasarkan parameter daya keluaran, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*)?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis sistem kerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun.
2. Menganalisis besarnya daya listrik yang dihasilkan generator pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).
3. Menganalisis kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berdasarkan parameter daya keluaran, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*).

1.4 Batasan Masalah

Agar pembahasan tidak menyimpang dari tujuan penelitian, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun.
2. Analisis kinerja dibatasi pada daya keluaran, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*) berdasarkan data operasional generator sebagai keluaran sistem PLTU.
3. Penelitian tidak membahas perancangan atau modifikasi peralatan PLTU.
4. Data penelitian menggunakan data operasional generator PLTU selama periode pengamatan yang diperoleh dari laporan kerja praktik di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. **Manfaat Akademis**

Penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan dan pemahaman mahasiswa Program Studi Teknik Elektro mengenai sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), khususnya dalam analisis kinerja pembangkit berdasarkan daya keluaran, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*). Selain itu, penelitian ini juga dapat dijadikan sebagai referensi bagi mahasiswa lain yang akan melakukan penelitian sejenis.

2. **Manfaat Praktis**

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun berdasarkan data operasional generator sebagai keluaran sistem pembangkit. Informasi tersebut dapat digunakan sebagai bahan evaluasi dalam upaya menjaga keandalan pasokan energi listrik untuk mendukung proses operasional pabrik.

3. **Manfaat bagi Penulis**

Penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan kemampuan penulis dalam menerapkan teori yang diperoleh selama perkuliahan ke dalam kondisi nyata di lapangan, khususnya dalam menganalisis sistem pembangkit listrik tenaga uap di lingkungan industri.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah pemahaman terhadap isi penelitian ini, maka sistematika penulisan laporan skripsi disusun sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas teori-teori pendukung yang berkaitan dengan penelitian, meliputi pengertian pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), prinsip kerja PLTU,

komponen utama PLTU, sistem kelistrikan pembangkit, serta teori daya listrik, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode penelitian yang digunakan, meliputi lokasi dan waktu penelitian, jenis dan sumber data, teknik pengumpulan data, serta tahapan analisis kinerja PLTU berdasarkan daya keluaran, energi listrik, dan faktor beban.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil pengolahan data dan analisis kinerja PLTU di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun, yang meliputi perhitungan daya listrik, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*) berdasarkan data operasional generator.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian serta saran-saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu sistem pembangkit listrik yang banyak digunakan pada sektor industri karena mampu menghasilkan daya listrik dalam jumlah besar serta memiliki tingkat keandalan operasi yang tinggi. Kinerja PLTU sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional pembangkit dan variasi beban yang dilayani Zein et al., (2023). Oleh karena itu, analisis kinerja PLTU perlu dilakukan untuk mengetahui kemampuan pembangkit dalam menyediakan energi listrik secara optimal dan berkelanjutan (Husain et al., 2024).

Beberapa penelitian terdahulu terkait analisis kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap telah dilakukan sebagai acuan akademis. Wahyu et al., (2023) menganalisis performa operasi PLTU dengan pendekatan model teknis sistem tenaga listrik dan menunjukkan bahwa PLTU mampu merespon variasi beban dengan performa operasi yang stabil. Kumendong & Mende, (2023) meneliti kinerja unit PLTU Sulut-3 dengan meninjau pengaruh peralatan pendukung terhadap keandalan dan efisiensi pembangkit, yang menunjukkan bahwa gangguan pada sistem pendukung berdampak pada indeks kinerja pembangkit.

Zein et al., (2023) melakukan analisis kinerja PLTU Pangkalan Susu Unit 1 berdasarkan *heat rate* dan *efisiensi termal*, yang menunjukkan adanya hubungan antara beban operasi dan efisiensi pembangkit. Freddy dan Romy (2025) menganalisis distribusi energi pada unit PLTU Dual Fuel Line 3 di PT Riau Andalan Pulp and Paper dan memperoleh nilai efisiensi termal sistem sebesar 33,52%. Ramadhoni et al., (2024) melakukan penelitian mengenai *Analisa Kapasitas Penggunaan Generator Turbin 800 kW Terhadap Pemakaian Beban di PTPN IV Unit PKS Berangir*. Penelitian tersebut menganalisis pemakaian turbin uap dalam memenuhi kebutuhan energi listrik pada proses pengolahan kelapa sawit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemakaian maksimum turbin uap mencapai 574,19 kW atau 71,77% dari kapasitas turbin yang digunakan. Penelitian tersebut juga menganalisis penggunaan bahan bakar fiber dan cangkang serta energi listrik yang dihasilkan.

Penelitian lain oleh Yawan Fauzy Dharmawan, (2024) menganalisis efisiensi generator PLTU pada pabrik gula berdasarkan tekanan uap, temperatur, dan daya keluaran generator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan daya keluaran berbanding lurus dengan efisiensi generator, namun penelitian tersebut masih terbatas pada komponen generator dan belum mengkaji parameter beban serta energi listrik secara menyeluruh pada industri kelapa sawit. Syahputra et al., (2024) meneliti kinerja generator sinkron pada steam power plant PT POMI Paiton Unit 7 dan menunjukkan hubungan antara operasi generator dan stabilitas sistem pembangkit.

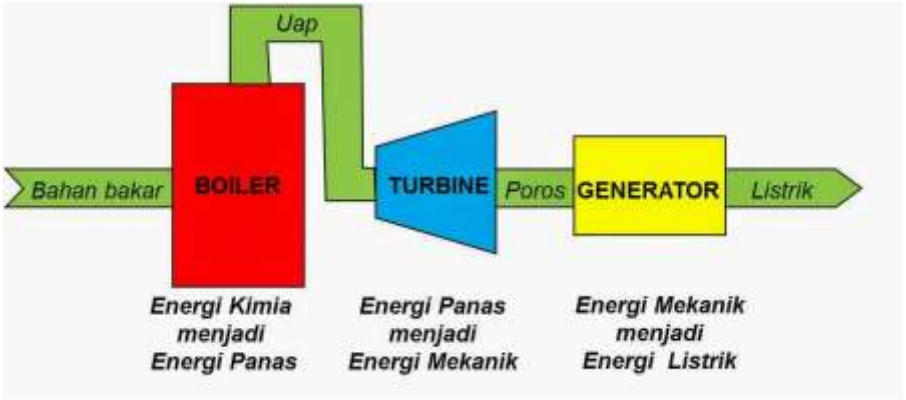
Berdasarkan hasil telaah penelitian terdahulu, sebagian besar penelitian mengenai kinerja PLTU berfokus pada analisis *heat rate*, *efisiensi termal*, *efisiensi boiler, efisiensi turbin*, maupun analisis eksergi. Namun, penelitian ini difokuskan pada analisis kinerja PLTU berdasarkan parameter keluaran generator, yaitu daya listrik, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*) sesuai dengan ketersediaan data operasional di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun, sehingga diharapkan dapat memberikan gambaran kondisi operasional pembangkit secara nyata di lingkungan industri kelapa sawit.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi panas hasil pembakaran bahan bakar untuk menghasilkan uap air bertekanan dan bertemperatur tinggi. Energi panas tersebut diperoleh dari proses pembakaran bahan bakar di dalam *boiler,* yang selanjutnya digunakan untuk mengubah air menjadi uap. Uap bertekanan tinggi ini dialirkan menuju turbin uap untuk menghasilkan energi mekanik berupa putaran poros.

Putaran poros turbin kemudian diteruskan ke generator yang terhubung secara langsung, sehingga energi mekanik tersebut dikonversikan menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Proses konversi energi pada PLTU secara umum mengikuti siklus *Rankine*, yaitu konversi energi termal menjadi energi mekanik dan selanjutnya menjadi energi listrik (Sihombing et al., 2024).



Gambar 2. 1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pada industri kelapa sawit, PLTU umumnya digunakan sebagai pembangkit listrik mandiri (*captive power plant*) untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dan uap proses. Di PT Perkebunan Nusantara Iv Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun Labuhan Batu Selatan, PLTU pada industri ini umumnya memanfaatkan limbah hasil produksi berupa serat (*fiber*) dan cangkang (*shell*) sebagai bahan bakar boiler. Pemanfaatan limbah ini tidak hanya meningkatkan efisiensi biaya operasional, tetapi juga mendukung konsep pemanfaatan energi terbarukan dan pengelolaan limbah industri.

2.2.2 Jenis – Jenis PLTU

1. PLTU Biomassa (*Biomass Steam Power Plant*)

PLTU biomassa adalah pembangkit listrik tenaga uap yang menggunakan bahan bakar biomassa, seperti limbah pertanian dan limbah industri. Pada industri kelapa sawit, biomassa yang digunakan umumnya berupa serat (*fiber*) dan cangkang (*shell*) hasil proses pengolahan tandan buah segar. Pemanfaatan biomassa ini memungkinkan pabrik kelapa sawit menghasilkan energi listrik dan uap secara mandiri serta mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil (Mulkan, 2025).

2. PLTU *Captive Power Plant*

PLTU *captive power plant* merupakan pembangkit listrik yang dibangun untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dan uap suatu industri secara mandiri. Pada pabrik kelapa sawit, sistem ini digunakan untuk menyuplai listrik ke mesin-mesin produksi serta menyediakan uap proses. PLTU jenis ini umumnya tidak terhubung dengan jaringan listrik umum dan dioperasikan sesuai kebutuhan internal pabrik (Gimelli & Luongo, 2021).

3. PLTU Turbin Uap Tekanan Ba lik (*Back Pressure Steam Turbine*)

PLTU dengan turbin uap tekanan balik merupakan sistem pembangkit di mana uap keluaran turbin masih dimanfaatkan untuk keperluan proses industri. Pada pabrik kelapa sawit, uap bekas dari turbin digunakan untuk proses sterilisasi, pemanasan, dan pengolahan produksi. Sistem ini sangat cocok untuk industri yang membutuhkan energi listrik dan panas secara bersamaan (Wahyu et al., 2023).

4. PLTU Non-Kondensasi (*Non-Condensing Steam Power Plant*)

PLTU *non*-kondensasi merupakan pembangkit listrik tenaga uap yang tidak menggunakan kondensor untuk mengubah uap bekas menjadi air kembali. Uap keluaran turbin langsung dimanfaatkan untuk proses industri. Sistem ini memiliki konstruksi lebih sederhana dan biaya operasional lebih rendah, sehingga banyak diterapkan pada industri skala menengah seperti pabrik kelapa sawit (Stephen et al., 2023).

2.2.3 Bahan Bakar PLTU di Pabrik Kelapa Sawit

PLTU di pabrik kelapa sawit umumnya memanfaatkan limbah padat sawit seperti serabut *(fiber*) dan cangkang *(shell*) sebagai bahan bakar utama untuk boiler. Limbah biomassa tersebut memiliki nilai kalor yang cukup tinggi dan tersedia dalam jumlah besar pada setiap siklus produksi CPO, sehingga sangat cocok digunakan sebagai sumber energi panas untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi yang diperlukan untuk menggerakkan turbin uap. Penelitian yang dilakukan pada beberapa PKS menunjukkan bahwa komposisi serabut dan cangkang dapat mempengaruhi efisiensi pembakaran dan kinerja boiler, sehingga rasio bahan bakar yang tepat menjadi aspek penting dalam optimasi kinerja PLTU berbasis biomassa. Penggunaan bahan bakar biomassa tidak hanya mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, tetapi juga mendukung konsep energi terbarukan yang ramah lingkungan (Mulkan, 2025). Bahan bakar yang umum digunakan di PLTU pabrik kelapa sawit adalah:

2.2.3.1 *Fiber* (Serabut Kelapa Sawit)

Serabut adalah limbah organik bagian luar dari buah sawit yang dihasilkan dalam jumlah besar dari proses pengolahan Tandan Buah Segar (TBS). Serabut memiliki struktur berserat yang mudah terbakar dan relatif memiliki nilai kalor

yang cukup tinggi sehingga cocok sebagai salah satu komponen bahan bakar biomassa dalam boiler PLTU (Mulkan, 2025).



Gambar 2. 2Fiber (Serabut Kelapa Sawit)

2.2.3.2 *Palm Kernel Shell* (Cangkang)

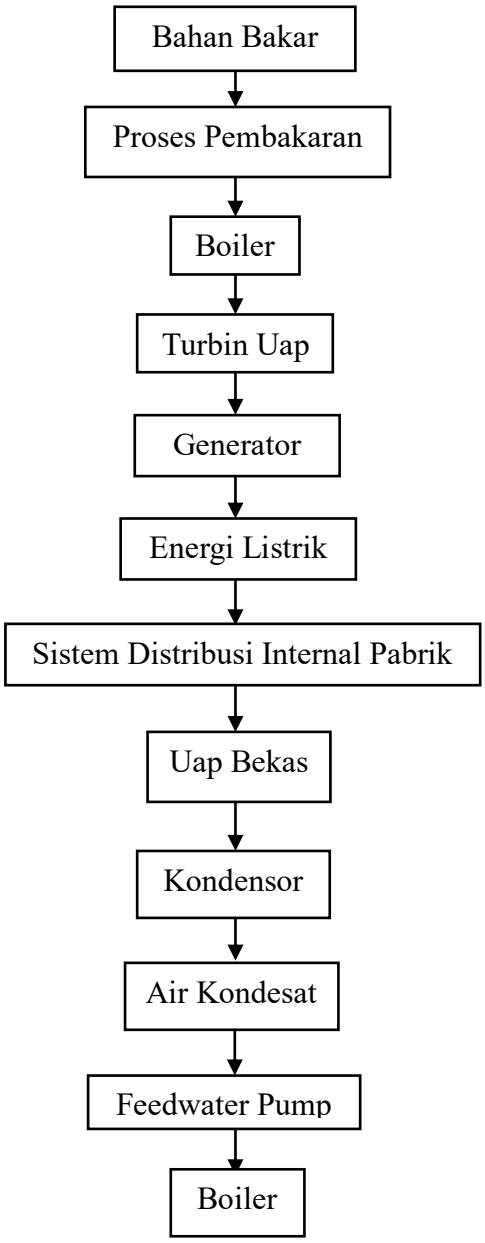
Cangkang adalah lapisan keras yang menyelimuti kernel (inti sawit). Karena sifatnya yang padat dan kering, cangkang memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dibanding beberapa jenis biomassa lain, sehingga sering dipakai sebagai bahan bakar utama atau dicampur dengan serabut untuk pembangkit uap (Roni et al., 2021). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa campuran antara serabut dan cangkang kelapa sawit dengan komposisi tertentu dapat mempengaruhi performa boiler, termasuk nilai calorinya, efisiensi pembakaran, dan konsumsi bahan bakar.



Gambar 2. 3Palm Kernel Shell (Cangkang)

2.2.4 Prinsip Kerja PLTU

Prinsip kerja PLTU pada dasarnya adalah konversi energi panas menjadi energi mekanik dan kemudian menjadi energi listrik melalui rangkaian komponen utama yang tersusun dalam suatu siklus termodinamika yang disebut Siklus *Rankine* (Takwanto, 2025). Proses ini melibatkan beberapa komponen utama yang bekerja secara berurutan dan saling terintegrasi.



Gambar 2. 4 Diagram Alir Proses Kerja PLTU

Berdasarkan diagram tersebut, energi panas dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar di dalam boiler untuk memanaskan air hingga menjadi uap bertekanan dan bertemperatur tinggi. Uap tersebut kemudian dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin uap yang terhubung dengan generator, sehingga energi mekanik hasil putaran turbin dikonversikan menjadi energi listrik. Uap sisa dari turbin selanjutnya dikondensasikan kembali menjadi air dan dipompa ulang menuju boiler, sehingga proses berlangsung secara berulang dalam suatu sistem tertutup.

Siklus kerja PLTU tersebut mengikuti prinsip Siklus *Rankine*, yang merupakan dasar operasi hampir seluruh pembangkit listrik tenaga uap. Siklus *Rankine* melibatkan perubahan *fase fluida* kerja dari air menjadi uap dan kembali menjadi air melalui proses pemanasan dan pendinginan. Berbeda dengan siklus udara seperti Siklus *Carnot*, perpindahan kalor pada Siklus *Rankine* dapat terjadi secara *isotermal*, khususnya pada proses penguapan di *boiler* dan kondensasi di kondensor.

Secara umum, prinsip kerja PLTU melibatkan empat komponen utama yang bekerja dalam satu siklus tertutup, yaitu:

Prinsip kerja PLTU melibatkan 4 komponen utama yang bekerja dalam sebuah siklus tertutup:

1. **Pompa Umpan Air (*Feedwater Pump*)**
    - Pompa ini menaikkan tekanan air (fluida kerja) dari tekanan rendah ke tekanan tinggi sebelum masuk boiler.
    - Karena air berada dalam fase cair, kerja kompresi oleh pompa relatif kecil dibandingkan yang dihasilkan turbin (Awliya et al., 2021).
2. **Boiler (Ketel Uap)**
    - Air bertekanan tinggi dipanaskan di dalam boiler oleh panas hasil pembakaran bahan bakar (seperti limbah biomassa di pabrik sawit) untuk menjadi uap jenuh, kemudian uap superpanas.
    - Di sinilah energi panas dari bahan bakar diubah menjadi energi termal pada uap.
3. **Turbin Uap**
    - Uap superpanas yang bertekanan tinggi diarahkan ke turbin uap.
    - Saat uap mengembang di turbin, energi termalnya berubah menjadi energi mekanik putaran.
    - Poros turbin ini terhubung langsung ke generator listrik.
4. **Kondensor**
    - Uap yang keluar dari turbin sudah bertekanan dan bersuhu lebih rendah, kemudian dikondensasikan menjadi air kembali di kondensor.
    - Air ini kemudian kembali ditampung dan dipompa ulang sehingga siklus bisa berjalan terus.

Kemudian keempat komponen ini bekerja secara serempak membentuk Siklus Rankine, yaitu proses termodinamika tertutup yang diulang terus menerus selama pembangkit beroperasi.

Siklus Rankine dapat diuraikan menjadi empat tahapan termodinamika utama yang harus dipahami secara berurutan:

- Proses 1 → 2: Kompresi Isentropik (Pompa)

Air yang sudah dikondensasikan (cair) dipompa oleh feedwater pump dari tekanan rendah menjadi tekanan tinggi tanpa perubahan entropi besar (*isentropik*). Karena kondisi fluida berupa cairan, energinya kecil dibanding kerja turbin.

- Proses 2 → 3: Penambahan Panas Isobarik di Boiler

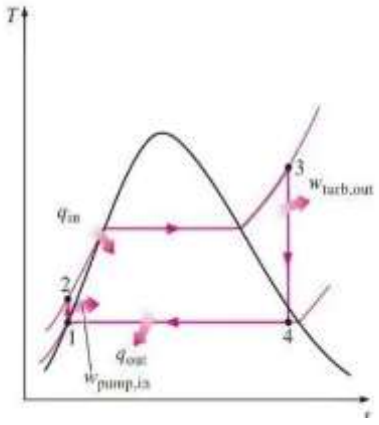
Air bertekanan tinggi dipanaskan di boiler pada tekanan konstan, pertama-tama berubah fase dari cair ke uap jenuh, lalu dipanaskan lebih lanjut menjadi uap superpanas.

- Proses 3 → 4: Ekspansi Isentropik di Turbin

Uap superpanas masuk ke turbin dan mengalami ekspansi tanpa penambahan panas (isentropik), sehingga tekanan dan suhu turun namun energi uap diubah menjadi energi mekanik untuk memutar turbin.

- Proses 4 → 1: Pelepasan Panas Isobarik di Kondensor

Uap yang keluar dari turbin disalurkan ke kondensor di mana uap tersebut mengkondensasi menjadi cair pada tekanan konstan dan suhu rendah. Air hasil kondensasi ini kemudian kembali ke pompa, sehingga siklus tertutup.



Gambar 2. 5 Siklus Rainkine

2.2.5 Komponen Utama PLTU

PLTU secara umum dibangun berdasarkan siklus Rankine, di mana tiap komponen utama bekerja saling terintegrasi untuk mengubah energi panas menjadi energi listrik. Komponen utama ini menjadi dasar analisis kinerja sistem pembangkit listrik uap (Djafar et al., 2021). Komponen utama PLTU meliputi**:**

1. Boiler, berfungsi menghasilkan uap dari air dengan memanfaatkan panas hasil pembakaran bahan bakar.
2. Turbin uap, berfungsi mengubah energi panas uap menjadi energi mekanik.
3. Sistem Kelistrikan PLTU, berfungsi
4. Generator, berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik.
5. Kondensor, berfungsi mengembunkan uap bekas menjadi air.
6. Sistem pompa dan peralatan pendukung lainnya.

2.2.5.1 Boiler

Boiler atau ketel uap merupakan peralatan utama pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berfungsi mengubah air umpan (*feed water*) menjadi uap (*steam*) bertekanan tinggi dan bertemperatur tinggi dengan memanfaatkan energi panas hasil pembakaran bahan bakar. Energi panas tersebut digunakan untuk memanaskan air hingga berubah fase menjadi uap bertekanan. Uap inilah yang menjadi energi kerja utama dalam menggerakkan turbin (Syalsabila et al., 2023).

Pada PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun digunakan boiler jenis water tube boiler, yaitu boiler yang airnya mengalir di dalam pipa-pipa dan dipanaskan oleh gas hasil pembakaran di sekeliling pipa. Jenis boiler ini memiliki keunggulan dalam menghasilkan uap dengan kapasitas besar, respon pemanasan yang cepat, serta mampu beroperasi pada tekanan yang relatif tinggi sehingga sesuai untuk kebutuhan industri.

Uap yang dihasilkan oleh boiler digunakan untuk menggerakkan turbin uap yang terhubung dengan generator untuk menghasilkan energi listrik. Sisa uap dari turbin selanjutnya dimanfaatkan melalui sistem *back pressure vessel* (BPV) untuk didistribusikan ke stasiun proses lainnya di pabrik kelapa sawit. Dengan demikian, kinerja boiler sangat mempengaruhi kontinuitas pasokan uap dan daya listrik yang dihasilkan oleh PLTU.



Gambar 2. 6 Boiler

2.2.5.2 Turbin Uap

Turbin uap merupakan salah satu komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berfungsi untuk mengubah energi panas dan tekanan dari uap menjadi energi mekanik berupa putaran poros (Syalsabila et al., 2023). Uap bertekanan dan bertemperatur tinggi yang dihasilkan oleh boiler dialirkan menuju turbin uap, sehingga energi kinetik uap akan memutar sudu-sudu turbin. Putaran poros turbin uap selanjutnya diteruskan ke generator yang terhubung secara langsung untuk menghasilkan energi listrik. Dengan demikian, turbin uap berperan sebagai penghubung antara sistem termal (boiler) dan sistem kelistrikan (generator) dalam proses konversi energi pada PLTU (Azubuike et al., 2023).



Gambar 2. 7 Turbin Uap

Pada PLTU di Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun, uap yang dihasilkan boiler digunakan sebagai sumber energi penggerak turbin uap untuk memenuhi kebutuhan daya listrik pabrik. Uap sisa dari turbin selanjutnya dimanfaatkan kembali atau dialirkan ke sistem pendukung proses produksi, sehingga pemanfaatan energi uap dapat berlangsung secara optimal.

Dalam penelitian ini, turbin uap tidak dianalisis dari sisi efisiensi maupun performa mekanisnya. Turbin uap dijelaskan sebagai bagian dari sistem

pembangkitan listrik yang berfungsi menghasilkan daya mekanik guna mendukung keluaran daya listrik yang dianalisis berdasarkan parameter daya keluaran, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*).

2.2.5.3 Generator Sinkron

Generator sinkron disebut sinkron atau serempak karena merupakan mesin listrik yang berfungsi mengubah energi mekanik yang berasal dari putaran turbin uap menjadi energi listrik arus bolak-balik (AC) melalui prinsip induksi elektromagnetik dan biasa diproduksi untuk menghasilkan listrik AC 1-fasa atau 3-fasa. Pada PLTU, generator sinkron dihubungkan langsung dengan turbin sehingga kecepatan putar rotor harus sinkron dengan frekuensi sistem tenaga listrik (Azubuike et al., 2023). Generator ini bekerja pada kecepatan putar tertentu yang sinkron dengan frekuensi sistem tenaga listrik. Pada sistem pembangkit industri, generator sinkron umumnya digunakan karena mampu menghasilkan daya dengan kualitas tegangan dan frekuensi yang stabil (Juliana et al., 2023).

Kinerja generator memengaruhi besarnya daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit. Besar kecilnya daya keluaran generator dipengaruhi oleh kondisi pembebanan dan kondisi operasi sistem pembangkitan. Dalam penelitian ini, generator merupakan komponen utama yang menjadi sumber data keluaran listrik. Parameter tegangan, arus, faktor daya, dan waktu operasi digunakan sebagai dasar untuk menghitung daya listrik, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*). Ketiga parameter tersebut selanjutnya digunakan untuk menganalisis kinerja PLTU berdasarkan kemampuan pembangkit dalam menghasilkan dan menyediakan energi listrik bagi kebutuhan operasional pabrik.

Generator sinkron yang digunakan pada PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun merupakan generator yang digerakkan oleh turbin uap berbahan bakar biomassa. Dalam penelitian ini, analisis tidak dilakukan terhadap efisiensi generator, tetapi difokuskan pada parameter keluaran generator berupa daya listrik, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*) sebagai indikator kinerja pembangkitan listrik.



Gambar 2. 8 Generator

Adapun syarat yang harus dipenuhi dalam melakukan penyinkronan generator adalah:

1. Tegangan kedua generator harus sama
2. Frekuensi sistem harus sama.
3. Mempunyai sudut fasa yang sama.
4. Mempunyai sudut fasa yang sama bisa diartikan, kedua fasa dari 2 Generator mempunyai sudut fasa yang berhimpit sama atau 0 derajat.

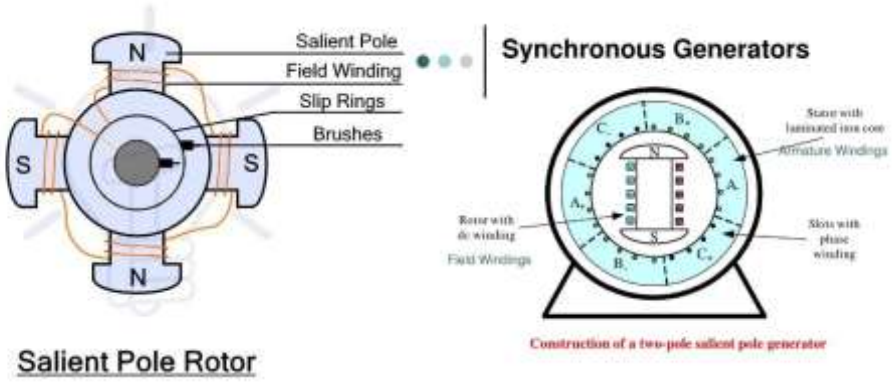
2.2.5.4 Jenis Generator Sinkron

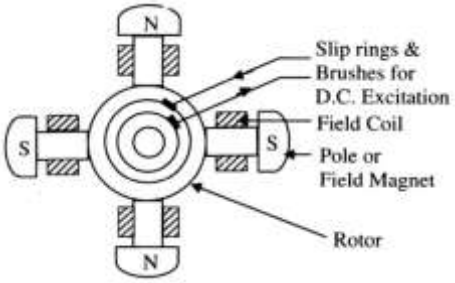
Generator sinkron merupakan jenis generator arus bolak-balik (AC) yang bekerja pada kecepatan putar sinkron sesuai dengan frekuensi sistem tenaga listrik. Berdasarkan bentuk konstruksi rotornya, generator sinkron dibedakan menjadi dua jenis, yaitu salient pole generator dan cylindrical rotor generator. Perbedaan utama kedua jenis generator tersebut terletak pada bentuk rotor, kecepatan putar, serta aplikasi penggunaannya pada sistem pembangkit listrik (Chapman, 2023).

1. Salient Pole Generator (Rotor Kutub Menonjol)

Generator sinkron tipe salient pole memiliki rotor dengan kutub-kutub magnet yang menonjol keluar dari permukaan rotor. Rotor jenis ini mempunyai diameter yang relatif besar dan panjang poros yang lebih pendek. Jumlah kutubnya banyak sehingga sesuai digunakan pada pembangkit dengan kecepatan putar rendah, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) maupun Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) industri berbasis turbin uap tekanan rendah atau turbin biomassa.

Keunggulan generator salient pole antara lain memiliki konstruksi yang lebih sederhana, torsi awal yang besar, mudah dalam proses pendinginan, serta cocok digunakan pada sistem pembangkit dengan putaran rendah. Oleh karena itu, generator jenis ini banyak diterapkan pada industri kelapa sawit yang menggunakan turbin uap biomassa sebagai penggerak generator.





Gambar 2. 9 Generator Sinkron Tipe Salient Pole

2. Cylindrical Rotor Generator (Rotor Silinder)

Generator sinkron tipe **cylindrical rotor** atau rotor silinder memiliki bentuk rotor yang halus tanpa kutub yang menonjol. Rotor ini mempunyai diameter lebih kecil, tetapi panjang poros lebih besar dibandingkan tipe salient pole. Jumlah kutub generator relatif sedikit, biasanya dua hingga empat kutub, sehingga mampu beroperasi pada kecepatan putar tinggi.

Generator cylindrical rotor umumnya digunakan pada pembangkit listrik skala besar seperti PLTU berbahan bakar batubara, PLTG, maupun PLTGU karena mampu menghasilkan putaran yang tinggi dan stabil. Rotor silinder juga mempunyai keseimbangan mekanik yang lebih baik sehingga cocok digunakan pada turbin uap berkecepatan tinggi.

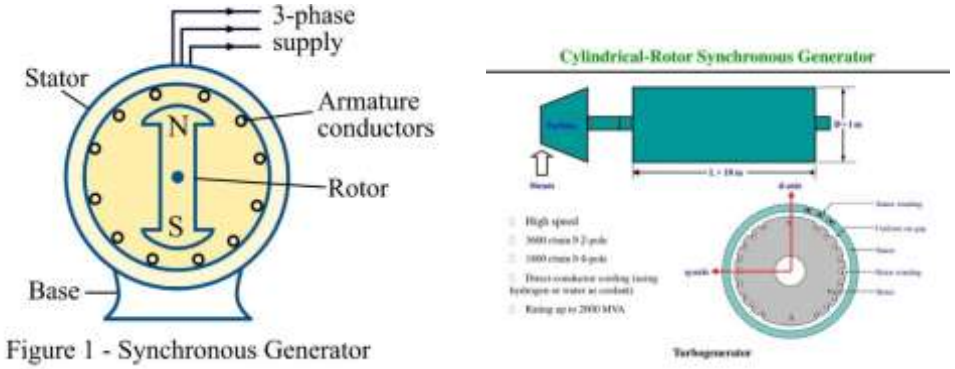


Figure 1 - Synchronous Generator

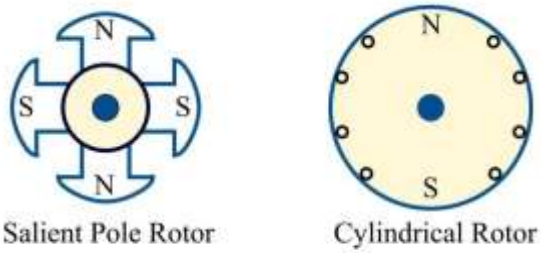


Figure 2 - Synchronous Generator Rotors

Gambar 2. 10 Generator Sinkron Tipe Cylindrical Rotor

Tabel 2. 1Perbandingan Salient Pole dan Cylindrical Rotor

Aspek	Salient Pole	Cylindrical Rotor
Bentuk rotor	Kutub menonjol	Silinder halus
Diameter rotor	Besar	Kecil
Panjang rotor	Pendek	Panjang
Jumlah kutub	Banyak	Sedikit
Kecepatan putar	Rendah	Tinggi
Jenis turbin	Turbin air dan turbin uap biomassa	Turbin uap kecepatan tinggi
Aplikasi	PLTA, PLTU industri, PKS	PLTU besar, PLTG, PLTGU

2.2.5.5 Sistem eksitasi

Sistem eksitasi atau biasa disebut sistem penguatan adalah suatu perangkat yang memberikan arus penguat (If) kepada kumparan medan generator AC yang dijalankan dengan cara membangkitkan medan magnetnya dengan bantuan arus searah. Dengan mengatur besar kecilnya arus listrik tersebut maka dapat mengatur besar tegangan output generator dan mengatur besar daya reaktif yang diinginkan pada generator yang sedang paralel dengan sistem jaringan besar (Infinite bus). Sistem eksitasi dapat dibagi

menjadi dua jenis, yaitu sistem eksitasi dengan menggunakan sikat dan sistem eksitasi tanpa sikat.

1. Sistem Eksitasi menggunakan sikat Sistem eksitasi dengan menggunakan sikat terdiri dari:
   a. Sistem Eksitasi Statismerupakan sistem eksitasi yang sumber eksitasinya berasal dari keluaran generator sinkron itu sendiri.
   b. Sistem Eksitasi DinamikSistem eksitasi generator tersebut disuplai dari eksiteryang merupakan mesin bergerak.
2. Sistem Eksitasi tanpa sikat
   Sistem eksitasi tanpa sikat sama sekali tidak bergantung pada sumber listrik eksternal, melainkan dengan menggunakan pilot exciterdan sistem penyaluran arus eksitasi ke rotor generator utama.

2.2.5.6 AVR (Automatic Voltage Regulator)

Automatic Voltage Regulator (AVR) adalah sebuah divais pengatur tegangan yang digunakan pada generator sinkron untuk mensttabilkan tegangan keluaran yang dihasilkan.Apabila tegangan output generator dibawah tegangan normal tegangan generator, maka AVR akan memperbesar arus pengutan (exitacy) pada exiter. Dengan demikian apabila terjadi perubahan tegangan output generator dapat distabilkan oleh AVR secara otomatis.

2.2.5.7 Kondensor

Kondensor adalah penukar kalor (*heat exchanger*) yang mendinginkan uap bekas keluar dari turbin sehingga mengubahnya kembali menjadi air (kondensat). Proses ini penting untuk menjaga tekanan rendah di ujung turbin dan meningkatkan efisiensi siklus. Setelah melewati turbin, uap yang sudah tidak memiliki energi digunakan dalam kondensor untuk mengubahnya kembali menjadi air. Air ini kemudian dialirkan kembali ke boiler untuk memulai siklus baru (Andriyuda & Rusirawan, 2024).

2.2.5.8 Feedwater Pumps & Feedwater Heaters

Feedwater pump dan *feedwater heater* merupakan dua komponen penting dalam siklus Rankine pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) karena memainkan peran kunci dalam meningkatkan efisiensi termal dan kinerja

pembangkit**.** Feedwater pump adalah pompa bertekanan tinggi yang berfungsi untuk menaikkan tekanan dan mengalirkan air umpan dari deaerator atau kondensor menuju boiler pada tekanan yang diperlukan agar air dapat dipanaskan menjadi uap pada kondisi operasi boiler. Komponen ini sangat penting karena tekanan air yang tidak mencukupi akan menghambat proses pembentukan uap di dalam boiler dan menyebabkan turunnya efisiensi termal pembangkit (Wijaya et al., 2021).

Analisis kinerja feedwater pump umumnya dilakukan dengan mengevaluasi parameter tekanan, laju alir, daya pompa, serta efisiensi isentropik. Penelitian menunjukkan bahwa efisiensi feedwater pump yang rendah akan meningkatkan konsumsi daya internal pembangkit *(auxiliary power consumption*) sehingga menurunkan efisiensi total PLTU. Selain itu, kerugian energi yang terjadi pada pompa dapat dianalisis menggunakan pendekatan termodinamika dan eksergi untuk mengetahui potensi perbaikan sistem. Oleh karena itu, pengoperasian feedwater pump pada titik kerja optimal menjadi faktor penting dalam menjaga efisiensi dan keandalan pembangkit listrik tenaga uap (Gustika & Mardiyanto, 2024).

Selain itu, feedwater heater merupakan jenis penukar panas (*heat exchanger*) yang digunakan untuk memanaskan air umpan sebelum masuk ke boiler dengan memanfaatkan uap sisa (*extraction steam*) dari turbin. Pemanasan awal ini bertujuan untuk mengurangi energi panas yang harus disuplai oleh boiler, sehingga beban termal boiler dapat diminimalkan dan efisiensi siklus secara keseluruhan meningkat. Dalam penelitian yang dilakukan pada pembangkit listrik uap di Indonesia, penggunaan *feedwater heater*, baik tipe *high pressure* maupun *low pressure*, menunjukkan bahwa alat ini bekerja efektif untuk mentransfer panas sehingga proses pemanasan air umpan menjadi lebih efisien dan nilai efisiensi heater dapat mencapai rentang yang tinggi pada kondisi operasi normal. Penyusunan heater dalam konfigurasi yang tepat juga memengaruhi *heat rate* dan efisiensi neto pembangkit, di mana kondisi *off-service* terhadap heater tertentu dapat menyebabkan peningkatan nilai heat rate PLTU secara signifikan (Saputri et al., 2022).

Feedwater heater dapat berupa *open feedwater heater (*OFWH) yang memungkinkan kontak langsung antara uap dan air umpan, maupun *closed feedwater heater* (CFWH) yang memisahkan fluida melalui permukaan penukar panas, masing-masing memberikan kontribusi terhadap peningkatan suhu air umpan dengan karakteristik operasional yang berbeda. Komponen ini termasuk dalam upaya *regenerative Rankine cycle* yang secara teoritis dan praktis terbukti dapat meningkatkan efisiensi termal sistem pembangkit meskipun terdapat *trade-off* pada performa turbin karena ekstraksi uap. *Integrasi feedwater heater* yang tepat dalam desain siklus pembangkit modern terbukti meningkatkan kinerja siklus, mengurangi konsumsi bahan bakar, serta menurunkan *irreversibility* termodinamik dalam siklus uap yang kompleks (Febrianto & Fathurahman, 2025).

2.2.6 Sistem Kelistrikan PLTU

Sistem kelistrikan pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan suatu sistem yang berfungsi untuk menghasilkan, mengatur, mengamankan, dan mendistribusikan energi listrik yang dihasilkan generator ke seluruh beban listrik (Mado et al., 2023). Energi listrik yang dihasilkan generator berasal dari konversi energi mekanik turbin uap yang digerakkan oleh uap hasil pembakaran bahan bakar pada boiler. Setelah energi listrik dihasilkan, daya listrik disalurkan melalui generator**,** main switchboard (MSB)**,** transformator (apabila digunakan), dan panel distribusi sebelum dimanfaatkan oleh berbagai peralatan listrik di lingkungan pabrik.

Pada industri kelapa sawit, sistem kelistrikan PLTU berperan penting dalam menjaga kontinuitas proses produksi karena hampir seluruh peralatan utama seperti motor listrik, pompa, conveyor, blower, screw press, sterilizer, dan peralatan pendukung lainnya menggunakan energi listrik sebagai sumber tenaga. Oleh karena itu, sistem kelistrikan harus mampu menyediakan pasokan listrik yang stabil, aman, dan andal agar proses produksi dapat berlangsung tanpa gangguan.

Keandalan sistem kelistrikan dipengaruhi oleh kondisi generator, sistem distribusi, sistem proteksi, karakteristik beban, serta koordinasi antarperalatan listrik. Gangguan pada salah satu komponen dapat menyebabkan penurunan kualitas daya, kehilangan energi listrik, bahkan penghentian proses produksi. Oleh

sebab itu, evaluasi terhadap sistem kelistrikan menjadi salah satu upaya untuk mengetahui kemampuan pembangkit dalam memenuhi kebutuhan energi listrik secara berkesinambungan.

2.2.7 Sistem Distribusi Listrik pada PLTU

Sistem distribusi listrik pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik yang dihasilkan generator menuju seluruh beban listrik secara aman, andal, dan berkesinambungan. Setelah energi mekanik turbin dikonversi menjadi energi listrik oleh generator sinkron, daya listrik tidak langsung digunakan oleh peralatan produksi, tetapi terlebih dahulu melewati sistem distribusi yang terdiri atas Main Switchboard (MSB), Motor Control Center (MCC), panel distribusi, sistem proteksi, serta sistem pentanahan (grounding).

Pada industri kelapa sawit, sistem distribusi listrik memegang peranan penting karena hampir seluruh proses produksi bergantung pada motor-motor listrik sebagai penggerak utama. Gangguan pada sistem distribusi dapat menyebabkan berhentinya proses produksi sehingga mengakibatkan kerugian operasional. Oleh karena itu, sistem distribusi harus dirancang agar mampu menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik, mempertahankan kestabilan tegangan, serta melindungi peralatan listrik dari berbagai gangguan seperti arus lebih, hubung singkat, maupun gangguan tanah (Mado et al., 2023).

Menurut (Studi et al., 2023), sistem distribusi listrik industri harus memenuhi aspek keandalan (reliability), keamanan (safety), kualitas daya (power quality), dan kemudahan pemeliharaan (maintainability), sehingga operasi pembangkit dapat berlangsung secara optimal.

2.2.7.1 Main Switchboard (MSB)

Main Switchboard (MSB) merupakan panel utama yang menerima seluruh energi listrik dari generator sebelum didistribusikan ke berbagai panel beban. MSB berfungsi sebagai pusat pengaturan operasi pembangkit, pengukuran parameter listrik, koordinasi sistem proteksi, serta penghubung antara generator

dengan seluruh beban listrik. Didalam panel ini dipasang berbagai instrumen pengukuran seperti:

- Circuit Breaker Generator
- Busbar
- Voltmeter
- Ammeter
- Frequency Meter
- Power Meter
- Synchronizing Panel
- Relay Proteksi

MSB juga menjadi tempat operator melakukan sinkronisasi generator apabila pembangkit bekerja secara paralel dengan sumber listrik lainnya. Dengan adanya sistem proteksi tersebut, kerusakan pada generator maupun peralatan listrik lainnya dapat diminimalkan sehingga kontinuitas operasi pembangkit tetap terjaga (Tabaka, 2022).

2.2.7.2 Motor Control Center (MCC)

Motor Control Center (MCC) merupakan panel distribusi khusus yang digunakan untuk mengendalikan motor-motor listrik pada instalasi industri. Hampir seluruh beban di Pabrik Kelapa Sawit berupa motor listrik sehingga MCC menjadi salah satu komponen terpenting dalam sistem distribusi.

Motor yang dikendalikan MCC antara lain:

- Conveyor
- Screw Press
- Pompa
- Blower
- Fan
- Elevator

Selain sebagai pusat pengendali motor, MCC juga dilengkapi berbagai sistem pengaman seperti:

- Overload Relay
- Magnetic Contactor
- MCCB

- Thermal Protection

Penggunaan MCC memberikan kemudahan dalam proses pengoperasian, pemeliharaan, serta pengamanan motor t karena seluruh sistem kendali motor berada pada satu panel yang terintegrasi.

Menurut (Fortuna & Buscarino, 2022), penggunaan MCC mampu meningkatkan keselamatan kerja, mempermudah proses pengendalian motor, serta meningkatkan keandalan distribusi listrik pada industri.

2.2.7.3 Panel Distribusi

Panel distribusi merupakan panel yang menerima pasokan listrik dari Main Switchboard untuk kemudian menyalurkannya menuju kelompok beban tertentu sesuai kebutuhan operasional pabrik. Setiap panel distribusi biasanya melayani beberapa kelompok peralatan yang memiliki karakteristik beban berbeda sehingga memudahkan proses pengendalian maupun pemeliharaan sistem tenaga listrik.

Pada industri kelapa sawit, panel distribusi digunakan untuk menyalurkan energi listrik menuju motor penggerak conveyor, pompa air, screw press, blower, sterilizer, serta berbagai mesin proses lainnya. Pembagian panel distribusi dilakukan agar apabila terjadi gangguan pada salah satu kelompok beban, kelompok lainnya tetap dapat beroperasi sehingga proses produksi tidak berhenti secara keseluruhan.

Pada PLTU industri kelapa sawit, panel distribusi menyalurkan listrik menuju:

- Motor Sterilizer
- Screw Press
- Conveyor
- Pompa
- Blower
- Workshop
- Office
- Lighting

Panel distribusi juga berfungsi memudahkan pengoperasian serta memisahkan beban berdasarkan kapasitas sehingga apabila terjadi gangguan pada salah satu panel, panel lain tetap dapat beroperasi.

2.2.7.4 Circuit Breaker

Circuit Breaker (CB) merupakan alat proteksi yang berfungsi memutus aliran listrik secara otomatis dan menghubungkan aliran listrik secara otomatis apabila terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik seperti:

- Hubung singkat
- Beban lebih
- Gangguan tanah
- Arus lebih

Circuit Breaker bekerja lebih cepat dibandingkan sekering sehingga kerusakan peralatan dapat diminimalkan.

Circuit breaker memiliki kemampuan memutus arus gangguan dalam waktu yang sangat singkat sehingga dapat mencegah kerusakan sistem. Selain sebagai alat proteksi, circuit breaker juga digunakan sebagai saklar utama pada saat proses pemeliharaan peralatan listrik.

Pada PLTU, Circuit Breaker dipasang pada:

- Generator
- Main Switchboard
- MCC
- Panel Distribusi

Penggunaan Circuit Breaker meningkatkan keamanan sistem distribusi sekaligus menjaga kontinuitas operasi pembangkit.

Menurut (Management, 2022), koordinasi circuit breaker yang baik dapat meningkatkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik dan mengurangi waktu pemadaman akibat gangguan.

2.2.7.5 Relay Proteksi

Relay proteksi merupakan perangkat yang berfungsi mendeteksi adanya gangguan pada sistem tenaga listrik dan mengirimkan perintah kepada Circuit Breaker untuk memutus aliran listrik. Relay bekerja berdasarkan perubahan parameter listrik seperti arus, tegangan, frekuensi, maupun impedansi.

Jenis relay yang umum digunakan meliputi:

- Over Current Relay (OCR)
- Earth Fault Relay (EFR)
- Differential Relay

- Reverse Power Relay
- Under Voltage Relay
- Over Voltage Relay

Relay bekerja sangat cepat sehingga kerusakan generator maupun panel distribusi dapat dicegah.

2.2.7.6 Grounding

Grounding atau sistem pentanahan merupakan sistem pengaman yang menghubungkan bagian logam peralatan listrik dengan tanah. Tujuan utama grounding adalah melindungi manusia maupun peralatan dari bahaya tegangan sentuh ketika terjadi kebocoran arus listrik.

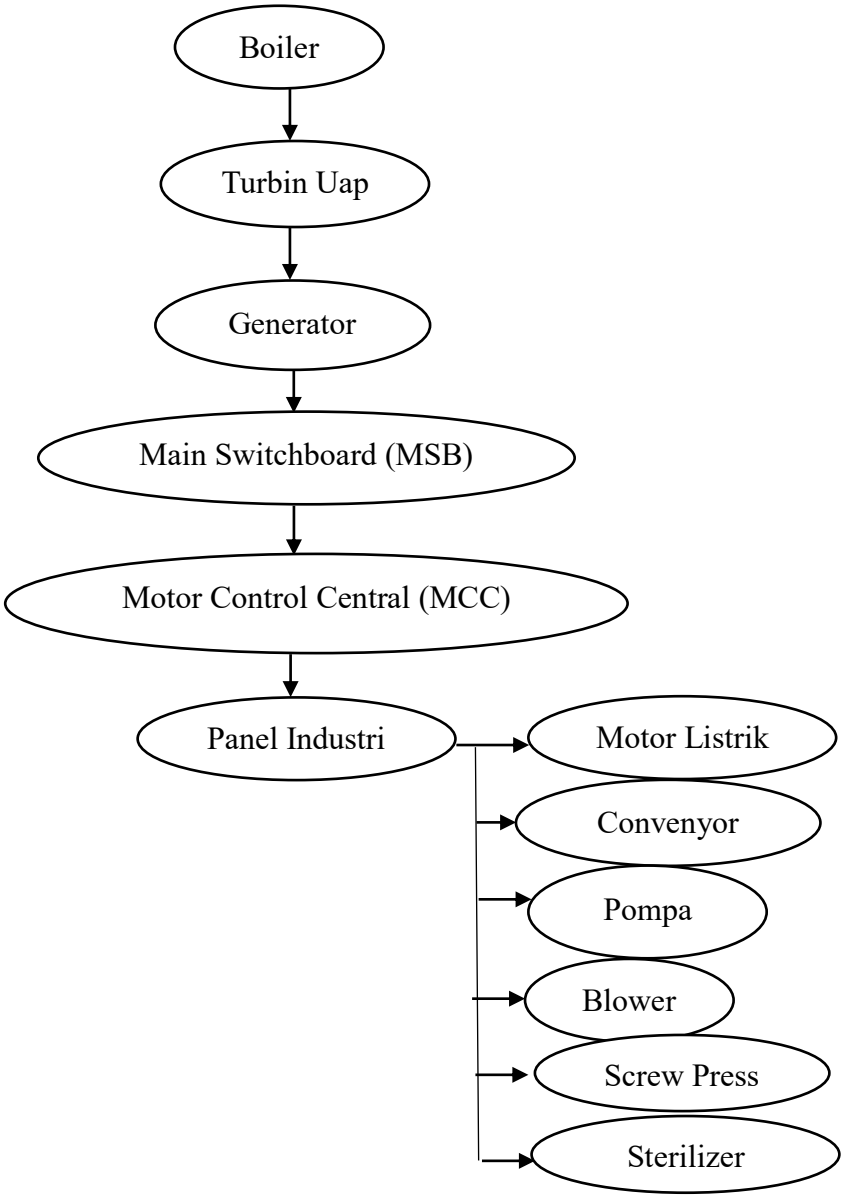
Pada PLTU, grounding diterapkan pada generator, panel distribusi, transformator, motor listrik, serta berbagai peralatan lainnya agar apabila terjadi gangguan arus bocor, arus tersebut langsung dialirkan menuju tanah sehingga risiko kerusakan maupun kecelakaan dapat diminimalkan.

Fungsi grounding antara lain:

- melindungi operator dari sengatan listrik,
- mengalirkan arus gangguan ke tanah,
- menjaga kestabilan tegangan sistem,
- melindungi generator dari kerusakan akibat petir,
- meningkatkan keandalan sistem distribusi.

Pada PLTU, grounding dipasang pada generator, panel listrik, transformator, motor listrik, dan seluruh rangka logam peralatan.

Menurut (Adegoke & Sun, 2023), sistem grounding yang baik berpengaruh terhadap kestabilan sistem tenaga listrik serta meningkatkan keselamatan operasi pembangkit.



Gambar 2. 11 Diagram PLTU

2.2.8 Karakteristik Beban Listrik pada Industri Kelapa Sawit

Beban listrik pada industri kelapa sawit merupakan seluruh peralatan yang menggunakan energi listrik untuk menunjang proses pengolahan Tandan Buah Segar (TBS) menjadi minyak kelapa sawit (*Crude Palm Oil/CPO*) dan inti sawit (*Palm Kernel*). Karakteristik beban pada pabrik kelapa sawit bersifat dinamis karena berubah mengikuti kapasitas produksi, kondisi operasi, serta jumlah

peralatan yang bekerja secara bersamaan. Perubahan beban tersebut secara langsung memengaruhi arus, tegangan, faktor daya, serta daya keluaran generator pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) (Bulatov et al., 2023).

Pada umumnya, beban listrik di pabrik kelapa sawit didominasi oleh motor listrik yang digunakan sebagai penggerak berbagai mesin produksi. Motor induksi tiga fasa menjadi jenis motor yang paling banyak digunakan karena memiliki konstruksi sederhana, efisiensi tinggi, serta mampu beroperasi secara kontinu pada lingkungan industri. Beban motor bersifat induktif sehingga membutuhkan daya reaktif untuk membentuk medan magnet, yang menyebabkan nilai faktor daya (*power factor*) menjadi salah satu parameter penting dalam pengoperasian generator (Saidur et al., 2022).

Beberapa peralatan utama yang menjadi beban listrik pada industri kelapa sawit antara lain sebagai berikut.

1. Motor Listrik

Motor listrik merupakan beban terbesar dalam sistem kelistrikan pabrik kelapa sawit. Hampir seluruh proses produksi menggunakan motor listrik sebagai penggerak utama berbagai mesin. Karena jumlah dan kapasitasnya yang besar, konsumsi energi motor listrik dapat mencapai lebih dari 70% total konsumsi energi listrik di industri. Oleh sebab itu, perubahan pembebanan motor akan sangat memengaruhi daya keluaran generator, arus, serta faktor daya sistem kelistrikan.

2. Conveyor

Conveyor berfungsi memindahkan tandan buah segar (TBS), serat (*fiber*), cangkang (*shell*), maupun hasil proses lainnya dari satu stasiun ke stasiun berikutnya. Conveyor bekerja secara kontinu selama proses produksi berlangsung sehingga menjadi salah satu beban listrik yang beroperasi hampir tanpa henti.

3. Screw Press

Screw press merupakan mesin yang digunakan untuk mengekstraksi minyak dari buah sawit yang telah mengalami proses pelumatan (*digester*). Mesin ini menggunakan motor listrik berdaya relatif besar karena harus menghasilkan tekanan mekanis yang tinggi untuk memisahkan minyak dari serat dan biji sawit.

Oleh karena itu, screw press termasuk salah satu beban listrik utama pada pabrik kelapa sawit.

4. Sterilizer

Sterilizer merupakan peralatan yang digunakan untuk merebus tandan buah segar menggunakan uap bertekanan. Walaupun sumber panas berasal dari uap hasil PLTU, sistem sterilizer tetap memerlukan energi listrik untuk mengoperasikan katup otomatis (*control valve*), sistem kontrol, instrumen, serta pompa pendukung selama proses sterilisasi berlangsung.

5. Blower

Blower berfungsi menyuplai udara pembakaran ke dalam boiler agar proses pembakaran biomassa berlangsung secara optimal. Motor blower bekerja secara terus-menerus selama boiler beroperasi sehingga menjadi salah satu beban penting dalam sistem kelistrikan PLTU. Kinerja blower yang baik akan memengaruhi efisiensi pembakaran dan kestabilan produksi uap.

6. Pompa

Pompa digunakan untuk mengalirkan berbagai fluida dalam sistem pembangkit maupun proses produksi, seperti air umpan boiler (*feedwater pump*), air pendingin, kondensat, serta minyak sawit. Sebagian besar pompa digerakkan oleh motor listrik tiga fasa sehingga turut memberikan kontribusi terhadap total beban listrik pabrik.

Secara umum, motor listrik merupakan beban listrik terbesar pada industri kelapa sawit karena hampir seluruh peralatan proses menggunakan motor sebagai penggerak utama. Besarnya konsumsi daya motor menyebabkan perubahan jumlah motor yang beroperasi akan langsung memengaruhi daya aktif, daya reaktif, faktor daya, serta daya keluaran generator. Oleh karena itu, analisis karakteristik beban listrik menjadi penting dalam mengevaluasi kemampuan generator PLTU dalam memenuhi kebutuhan energi listrik selama proses produksi berlangsung.

2.2.9 Keandalan Sistem Pembangkit

Keandalan sistem pembangkit (*power plant reliability*) merupakan kemampuan suatu pembangkit listrik untuk menghasilkan dan menyalurkan energi listrik secara kontinu sesuai kebutuhan beban selama periode operasi tertentu tanpa mengalami gangguan yang mengakibatkan penghentian proses produksi. Pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), keandalan dipengaruhi oleh kondisi peralatan utama seperti boiler, turbin uap, generator, sistem distribusi, serta sistem proteksi yang bekerja secara terintegrasi. Semakin tinggi tingkat keandalan sistem, semakin kecil kemungkinan terjadinya gangguan operasi yang dapat menghambat proses produksi industri (Mado et al., 2023).

Dalam industri kelapa sawit, keandalan pembangkit memiliki peranan yang sangat penting karena hampir seluruh proses produksi bergantung pada ketersediaan energi listrik. Gangguan pada sistem pembangkit dapat menyebabkan berhentinya operasi mesin produksi seperti conveyor, screw press, pompa, blower, dan peralatan lainnya. Oleh sebab itu, evaluasi terhadap keandalan pembangkit diperlukan untuk memastikan bahwa energi listrik dapat disuplai secara aman, stabil, dan berkelanjutan sesuai kebutuhan operasional pabrik.

Secara umum, keandalan sistem pembangkit dievaluasi berdasarkan tiga aspek utama yang dikenal sebagai Availability, Reliability, dan Maintainability (ARM).

2.2.9.1 Availability (Ketersediaan)

Availability merupakan tingkat ketersediaan suatu sistem atau peralatan untuk dapat beroperasi ketika dibutuhkan. Availability menunjukkan persentase waktu suatu pembangkit berada dalam kondisi siap menghasilkan energi listrik dibandingkan dengan total waktu operasi yang direncanakan.

Secara matematis, availability dinyatakan sebagai:

$$Availability = \frac{\text{Waktu Operasi}}{\text{Waktu Operasi + Waktu Gangguan}} \times 100\%$$

Semakin tinggi nilai availability, semakin besar peluang pembangkit menyediakan energi listrik secara kontinu. Pada PLTU industri, tingginya availability menjadi indikator bahwa pembangkit memiliki tingkat kesiapan operasi yang baik sehingga mampu mendukung kelangsungan proses produksi.

Availability dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain kondisi generator, jadwal pemeliharaan, kecepatan perbaikan ketika terjadi gangguan, kualitas sistem proteksi, serta ketersediaan suku cadang. Oleh karena itu, program pemeliharaan yang baik akan meningkatkan nilai availability pembangkit dan mengurangi waktu berhenti (*downtime*) (Rusady & Mado, 2023).

2.2.9.2 Reliability (Keandalan)

Reliability merupakan kemampuan suatu sistem atau komponen untuk menjalankan fungsi yang diharapkan tanpa mengalami kegagalan selama periode waktu tertentu pada kondisi operasi yang telah ditentukan.

Dalam sistem PLTU, reliability menunjukkan kemampuan seluruh komponen pembangkit, khususnya generator, untuk menghasilkan energi listrik secara terus-menerus tanpa mengalami kerusakan yang mengganggu proses produksi.

Semakin tinggi reliability suatu generator maka semakin kecil kemungkinan terjadi gangguan seperti:

- trip generator,
- gangguan isolasi,
- overheat,
- penurunan tegangan,
- gangguan frekuensi,
- kehilangan sinkronisasi.

Generator yang memiliki reliability tinggi mampu mempertahankan kualitas tegangan, frekuensi, dan kontinuitas penyaluran energi listrik sehingga proses produksi dapat berjalan tanpa gangguan.

Menurut standar IEEE, reliability menjadi salah satu indikator utama dalam evaluasi performa sistem tenaga listrik karena berhubungan langsung dengan kontinuitas pelayanan energi listrik kepada konsumen.

2.2.9.3 Maintainability (Kemudahan Pemeliharaan)

Maintainability merupakan kemampuan suatu peralatan untuk dipelihara, diperbaiki, atau dikembalikan ke kondisi operasi normal dalam waktu yang relatif singkat setelah mengalami gangguan.

Maintainability berkaitan erat dengan:

- kemudahan inspeksi,
- kemudahan penggantian komponen,
- ketersediaan suku cadang,
- prosedur pemeliharaan,
- kompetensi operator.

Generator yang memiliki maintainability tinggi akan membutuhkan waktu perbaikan yang lebih singkat sehingga waktu berhenti operasi (*downtime*) dapat diminimalkan.

Program pemeliharaan preventif (*preventive maintenance*) maupun prediktif (*predictive maintenance*) menjadi bagian penting dalam meningkatkan maintainability sistem pembangkit. Dengan demikian, umur peralatan dapat diperpanjang dan risiko kegagalan operasi dapat dikurangi.

2.2.10 Pentingnya Keandalan Generator pada PLTU

Generator merupakan komponen terakhir dalam proses konversi energi pada PLTU yang berfungsi mengubah energi mekanik dari turbin uap menjadi energi listrik. Oleh karena itu, generator menjadi komponen yang sangat menentukan keberhasilan proses pembangkitan listrik. Apabila generator mengalami gangguan atau berhenti beroperasi, maka energi listrik tidak dapat disalurkan kepada seluruh beban industri meskipun boiler dan turbin masih beroperasi dengan baik.

Pada industri kelapa sawit, pasokan energi listrik dari generator digunakan untuk mengoperasikan berbagai peralatan utama seperti motor listrik, pompa, conveyor, blower, screw press, sterilizer, dan sistem kontrol. Gangguan pada generator dapat menyebabkan terhentinya proses pengolahan tandan buah segar, menurunkan kapasitas produksi, meningkatkan biaya operasional, serta mengurangi efisiensi pembangkit.

Generator yang memiliki tingkat keandalan tinggi akan mampu menghasilkan tegangan dan frekuensi yang stabil, mempertahankan kontinuitas

pasokan energi listrik, serta menyesuaikan perubahan beban tanpa mengalami gangguan operasi. Oleh sebab itu, evaluasi terhadap parameter keluaran generator, seperti daya listrik, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*), menjadi salah satu cara untuk mengetahui kemampuan generator dalam mendukung keandalan sistem pembangkit secara keseluruhan.

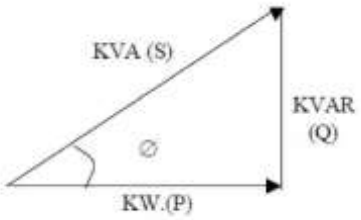
Dalam penelitian ini, pembahasan mengenai keandalan generator tidak dilakukan melalui perhitungan indeks *Availability*, *Reliability*, dan *Maintainability* (ARM), tetapi digunakan sebagai landasan teori untuk menjelaskan pentingnya menjaga kontinuitas operasi generator dalam memenuhi kebutuhan energi listrik pada PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun.

2.2.11 Parameter Keluaran Generator

Generator merupakan komponen akhir dalam sistem PLTU yang menghasilkan energi listrik dari energi mekanik turbin. Parameter keluaran generator seperti tegangan, arus, faktor daya, frekuensi, dan waktu operasi dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja pembangkit dari sisi keluaran listrik. Dalam penelitian ini, parameter yang digunakan adalah tegangan, arus, faktor daya, dan waktu operasi sebagai dasar perhitungan daya listrik, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*).

2.2.12 Daya Aktif, Daya Reaktif, dan Daya Semu (Power Triangle)

Dalam sistem tenaga listrik, daya listrik terdiri atas daya aktif, daya reaktif, dan daya semu. Ketiga besaran tersebut memiliki hubungan matematis yang dapat digambarkan melalui segitiga daya (*power triangle*). Daya aktif merupakan daya yang digunakan untuk melakukan kerja nyata, daya reaktif merupakan daya yang dibutuhkan untuk membentuk medan magnet pada peralatan listrik, sedangkan daya semu merupakan kombinasi antara daya aktif dan daya reaktif.



Gambar 2. 12 Segitiga Daya (*Power Triangle*)

Berdasarkan segitiga daya, hubungan antar besaran daya dirumuskan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{.....(2.1)}$$

Hubungan daya aktif dengan daya semu dinyatakan sebagai:

$$P = S \cos \varphi \text{.....(2.2)}$$

Sedangkan daya reaktif dinyatakan sebagai:

$$Q = S \sin \varphi \text{.....(2.3)}$$

Keterangan:

P = Daya aktif (kW)

Q = Daya reaktif (kVAR)

S = Daya semu (kVA)

φ = Sudut faktor daya

Segitiga daya digunakan untuk menggambarkan hubungan matematis antara ketiga jenis daya tersebut sekaligus menunjukkan besarnya faktor daya pada sistem tenaga listrik.

Pada generator tiga fasa, daya aktif yang dihasilkan dihitung menggunakan persamaan:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi \text{.....(2.4)}$$

Sedangkan daya semu dihitung dengan persamaan:

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \text{.....(2.5)}$$

Keterangan:

P = Daya listrik (W atau kW)

V = Tegangan antar fasa (Volt)

I = Arus listrik (*Ampere*)

cos φ = Faktor daya

Persamaan tersebut digunakan sebagai dasar perhitungan daya listrik generator dalam penelitian ini. Karena generator yang dianalisis merupakan sistem tiga fasa, maka perhitungan daya menggunakan faktor .$\sqrt{3}$ Nilai daya aktif yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung energi listrik dan faktor beban (*load factor*).

2.2.11.1 Daya Aktif (Daya Listrik)

Daya aktif (*active power*) merupakan daya listrik yang benar-benar digunakan untuk melakukan kerja nyata pada suatu beban listrik, seperti memutar motor listrik, menggerakkan pompa, conveyor, blower, maupun peralatan produksi lainnya. Pada sistem PLTU, daya aktif merupakan keluaran utama generator yang dimanfaatkan oleh seluruh peralatan listrik di lingkungan industri. Besarnya daya aktif dipengaruhi oleh tegangan, arus, dan faktor daya (*power factor*). Semakin besar nilai faktor daya, maka semakin besar pula daya aktif yang dapat dimanfaatkan oleh beban.

Secara matematis daya aktif dirumuskan sebagai:

$$P = S \cos \varphi \text{.....(2.6)}$$

Pada sistem tiga fasa, daya aktif dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi \text{.....(2.7)}$$

Keterangan:

- **P** = Daya aktif (W atau kW)
- **V** = Tegangan (Volt)
- **I** = Arus (Ampere)
- **cos φ** = Faktor daya

Dalam penelitian ini, daya aktif generator dinyatakan sebagai daya listrik yang dihasilkan (kW). Nilai daya listrik tersebut diperoleh dari hasil perhitungan menggunakan persamaan daya aktif pada sistem tiga fasa, yaitu berdasarkan tegangan, arus, dan faktor daya generator. Selanjutnya, nilai daya listrik yang dihasilkan digunakan sebagai variabel penelitian untuk menghitung energi listrik serta faktor beban (load factor) dalam mengevaluasi kinerja PLTU di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun.

2.2.11.2 Daya Reaktif (Reactive Power)

Daya reaktif (*reactive power*) merupakan daya yang diperlukan untuk membentuk medan magnet pada peralatan listrik induktif seperti motor induksi, transformator, dan generator sinkron. Daya ini tidak menghasilkan kerja nyata, namun sangat diperlukan agar sistem tenaga listrik dapat beroperasi dengan stabil. Besarnya daya reaktif dinyatakan dalam satuan VAR (*Volt Ampere Reactive*) atau kVAR (Lakshmanan et al., 2023).

Persamaan daya reaktif adalah:

$$Q = S \sin \varphi \text{.....(2.8)}$$

atau

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \varphi \text{.....(2.9)}$$

Keterangan:

- **Q** = Daya reaktif (VAR)
- **S** = Daya semu
- **φ** = Sudut faktor daya

Menurut (Lakshmanan et al., 2023), kebutuhan daya reaktif akan meningkat apabila sistem memiliki banyak beban induktif sehingga dapat menyebabkan penurunan faktor daya apabila tidak dikompensasi.

Dalam penelitian ini, daya reaktif digunakan sebagai bagian dari konsep segitiga daya untuk menjelaskan hubungan antara daya aktif, daya reaktif, daya semu, dan faktor daya pada generator. Daya reaktif bukan merupakan variabel utama dalam penilaian kinerja PLTU, tetapi digunakan untuk mendukung analisis parameter kelistrikan generator.

2.2.11.3 Daya Semu (Apparent Power)

Daya semu (*apparent power*) merupakan total daya yang disuplai generator kepada sistem tenaga listrik. Daya semu merupakan gabungan antara daya aktif dan daya reaktif sehingga menggambarkan kapasitas total generator dalam menyuplai energi listrik.

Daya semu dinyatakan dalam satuan VA atau kVA.

Hubungan antara daya aktif, daya reaktif, dan daya semu dirumuskan sebagai berikut:

$$\boxed{S = \sqrt{P^2 + Q^2}} \text{.....(2.10)}$$

Sedangkan pada sistem tiga fasa:

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \text{.....(2.11)}$$

Keterangan:

- **S** = Daya semu (VA)
- **P** = Daya aktif (W)
- **Q** = Daya reaktif (VAR)

Daya semu menunjukkan besarnya kapasitas listrik yang harus disediakan generator dalam melayani beban. Dalam penelitian ini, daya semu digunakan sebagai bagian dari analisis segitiga daya dan menjadi dasar dalam memahami hubungan antara daya aktif dan faktor daya generator.

2.2.11.4 Faktor Daya (*Power Factor*)

Faktor daya (*power factor*) merupakan perbandingan antara daya aktif (*active power*) dengan daya semu (*apparent power*). Nilai faktor daya menunjukkan tingkat efisiensi pemanfaatan energi listrik pada suatu sistem tenaga. Faktor daya yang mendekati satu menunjukkan bahwa sebagian besar energi listrik dimanfaatkan sebagai daya aktif, sedangkan faktor daya yang rendah menunjukkan meningkatnya daya reaktif sehingga dapat menyebabkan rugi-rugi daya dan penurunan efisiensi sistem. Dalam pengoperasian generator sinkron, perubahan pembebanan dan sistem eksitasi berpengaruh terhadap nilai faktor daya generator (Juliana et al., 2023).

Faktor daya dirumuskan sebagai:

$$\text{Cos}\boldsymbol{\varphi} \frac{P}{S} \text{.....(2.12)}$$

Keterangan:

Cos**φ =** Faktor daya

P = Daya aktif (kW)

S = Daya semu (kVA)

Nilai faktor daya berada antara 0 sampai 1. Nilai faktor daya yang semakin mendekati satu menunjukkan bahwa proporsi daya aktif terhadap daya semu semakin besar. Sebaliknya, faktor daya yang rendah menunjukkan bahwa kebutuhan daya reaktif relatif lebih besar terhadap daya aktif sehingga arus yang dibutuhkan sistem untuk menghasilkan daya aktif tertentu menjadi lebih besar.

Dalam penelitian ini, faktor daya digunakan sebagai salah satu parameter input dalam perhitungan daya aktif generator. Faktor daya tidak digunakan

sebagai ukuran efisiensi PLTU, tetapi digunakan untuk menentukan besarnya daya aktif yang dihasilkan generator berdasarkan data tegangan dan arus.

2.2.14 Faktor Daya terhadap Generator

1. Faktor daya tinggi (cos φ mendekati 1)

Apabila nilai faktor daya mendekati satu, sebagian besar daya semu akan berubah menjadi daya aktif sehingga energi listrik dapat dimanfaatkan secara optimal oleh beban. Kondisi ini menyebabkan arus generator menjadi lebih kecil untuk menghasilkan daya yang sama, sehingga rugi-rugi daya, pemanasan kumparan, dan penurunan tegangan dapat diminimalkan. Dengan demikian generator dapat bekerja lebih efisien serta umur peralatan menjadi lebih panjang.

2. Faktor daya rendah (cos φ kecil)

Sebaliknya, apabila faktor daya rendah maka kebutuhan daya reaktif akan meningkat sehingga arus yang mengalir pada generator juga semakin besar. Kondisi tersebut menyebabkan rugi-rugi daya meningkat, suhu generator menjadi lebih tinggi, efisiensi sistem menurun, serta kapasitas generator menjadi tidak termanfaatkan secara optimal. Oleh karena itu, pada sistem pembangkit listrik diperlukan pengaturan eksitasi generator atau pemasangan kompensasi daya reaktif agar faktor daya tetap berada pada kondisi yang baik.

2.2.14.1 Energi Listrik

Energi listrik merupakan hasil pemakaian daya listrik dalam selang waktu tertentu. Energi listrik dinyatakan dalam satuan *kilowatt-hour* (kWh) dan dirumuskan sebagai:

$$E = P \times t \quad \text{.....(2.5)}$$

Dimana:

E = energi listrik (kWh)

P = daya listrik (kW)

t = waktu (jam)

Dalam penelitian ini, energi listrik dihitung berdasarkan daya aktif (P) generator dan waktu operasi pembangkit. Nilai energi listrik menunjukkan jumlah energi yang dapat dihasilkan generator selama periode pengamatan dan selanjutnya digunakan sebagai salah satu parameter dalam perhitungan faktor beban (*load factor*).

2.2.14.2 Faktor Beban (*Load Factor*)

Faktor beban atau *load factor* merupakan perbandingan antara daya rata-rata dengan daya maksimum dalam suatu periode tertentu. Faktor beban digunakan untuk mengetahui tingkat pemanfaatan kapasitas pembangkit.

Secara matematis, faktor beban dirumuskan sebagai:

$$Load\ Faktor = \frac{E}{P\ maks \times t} \text{.....(2.6)}$$

Dimana:

E = Energi listrik yang dihasilkan (kWh)

P_{maks}= Daya maksimum pembangkit (kW)

t= Waktu operasi (jam)

Nilai daya aktif (**P**) yang digunakan dalam perhitungan energi listrik diperoleh dari hubungan segitiga daya, yaitu:

$$P = S\cos\varphi \text{.....(2.7)}$$

Dalam penelitian ini, faktor beban digunakan sebagai salah satu indikator untuk mengevaluasi kinerja PLTU dari sisi pemanfaatan kapasitas pembangkitan. Faktor beban tidak menunjukkan efisiensi generator, melainkan menunjukkan tingkat pemanfaatan kapasitas pembangkit selama periode operasi.

2.2.15 Faktor yang Mempengaruhi Kinerja PLTU

Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap dipengaruhi oleh berbagai kondisi operasional pembangkit dan karakteristik beban yang dilayani. Dalam penelitian ini, faktor-faktor tersebut dijelaskan sebagai landasan untuk memahami perubahan daya listrik, energi listrik, dan faktor beban yang dihasilkan generator.

Beberapa faktor yang dapat memengaruhi keluaran listrik PLTU antara lain:

1. Kondisi bahan bakar

Kualitas dan ketersediaan bahan bakar memengaruhi proses pembakaran pada boiler. Pembakaran yang berlangsung secara baik akan mendukung kontinuitas produksi uap yang digunakan untuk menggerakkan turbin (Mubarak & Arham, 2024).

2. Kondisi tekanan dan temperatur uap

Tekanan dan temperatur uap merupakan parameter operasi yang berkaitan dengan kemampuan uap dalam menggerakkan turbin. Perubahan kondisi uap

dapat memengaruhi kemampuan turbin dalam menghasilkan putaran mekanik yang selanjutnya diteruskan ke generator (Saputra, 2023).

3. Beban listrik

Perubahan jumlah dan kapasitas beban listrik yang beroperasi di pabrik akan memengaruhi kebutuhan daya listrik generator. Semakin banyak peralatan listrik yang beroperasi secara bersamaan, maka kebutuhan daya yang harus disuplai generator juga dapat meningkat (Zein et al., 2023).

4. Kondisi generator

Kondisi generator memengaruhi besarnya tegangan, arus, faktor daya, dan daya listrik yang dihasilkan. Pengoperasian generator yang sesuai dengan kondisi kerja yang ditentukan diperlukan untuk menjaga kestabilan keluaran listrik(Mubarak & Arham, 2024).

5. Waktu operasi

Waktu operasi berhubungan langsung dengan jumlah energi listrik yang dihasilkan. Semakin lama generator beroperasi pada suatu tingkat daya tertentu, semakin besar energi listrik yang dapat dihasilkan.

Berdasarkan faktor tersebut, penelitian ini memfokuskan analisis pada keluaran listrik generator berupa daya listrik, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*) sebagai parameter untuk menggambarkan kinerja PLTU (Mubarak & Arham, 2024)..

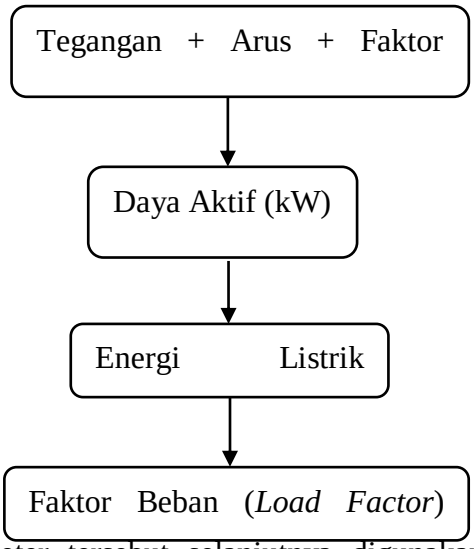
2.2.16 Kinerja PLTU

Kinerja PLTU menunjukkan kemampuan suatu pembangkit listrik untuk mengubah energi panas dari pembakaran bahan bakar menjadi energi listrik secara efisien, melalui serangkaian proses termodinamika (Siklus *Rankine*), operasi peralatan utama (boiler, turbin, generator), dan manajemen operasional yang baik (Zein et al., 2023).

Namun, penelitian ini tidak melakukan perhitungan efisiensi termal, efisiensi boiler, efisiensi turbin, maupun efisiensi generator. Penelitian difokuskan pada analisis kinerja PLTU dari keluaran generator yang meliputi daya listrik, energi listrik, dan faktor beban (load factor). Ketiga parameter tersebut dipilih

karena menggambarkan kemampuan pembangkit dalam menghasilkan energi listrik untuk memenuhi kebutuhan operasional pabrik.

Hubungan parameter yang digunakan dalam penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut:



Ketiga parameter tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk menggambarkan kemampuan PLTU dalam menghasilkan dan menyediakan energi listrik bagi kebutuhan operasional PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian deskriptif kuantitatif. Pendekatan deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi dan sistem kerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun berdasarkan data operasional yang tersedia. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk menganalisis kinerja PLTU melalui perhitungan parameter daya keluaran, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*).

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun yang berlokasi di Kabupaten Labuhan Batu Selatan, Sumatera Utara. Waktu pelaksanaan penelitian ini direncanakan selama enam bulan, terhitung sejak Januari 2026 hingga Juni 2026.

3.1 Objek Penelitian

Objek penelitian dalam tugas akhir ini adalah sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik internal Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun. Fokus penelitian diarahkan pada analisis kinerja generator berdasarkan daya listrik yang dihasilkan, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*) sebagai indikator kinerja pembangkit.

3.4 Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari:

1. Data primer diperoleh secara langsung melalui observasi dan pencatatan data operasional PLTU selama pelaksanaan penelitian di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun. Data yang dikumpulkan meliputi tegangan keluaran generator (Volt), arus generator (Ampere), faktor daya (*power factor* atau cos φ), waktu operasi pembangkit (jam), serta data daya maksimum generator apabila tersedia. Data tersebut digunakan sebagai dasar dalam menghitung daya listrik yang dihasilkan, energi listrik, serta faktor beban (*load factor*).
2. Data sekunder diperoleh dari dokumen dan laporan resmi milik pabrik, antara lain laporan operasional PLTU, log sheet harian pembangkit, laporan konsumsi energi listrik internal pabrik, serta dokumen teknis pendukung lainnya yang berkaitan dengan sistem pembangkitan listrik tenaga uap. Data sekunder juga didukung oleh literatur berupa buku dan jurnal ilmiah yang relevan dengan topik penelitian.

3.5 Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Observasi, yaitu pengamatan langsung terhadap sistem operasi PLTU di Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun.
2. Studi dokumentasi, yaitu pengumpulan data dari laporan operasional, log sheet operasi pembangkit, serta dokumen pendukung lainnya.
3. Studi literatur, yaitu pengumpulan referensi dari buku, jurnal ilmiah, dan sumber pustaka lain yang relevan dengan topik penelitian.

3.6 Alat dan Bahan

Tabel 3. 1 Alat Penelitian

No	Nama Alat	Spesifiikasi	Fungsi
1	Laptop	Processor minimal Intel i3	Mengolah dan menganalisis data penelitian
2	Perangkat Lunak (Microsoft Excel)	Versi 2016 atau lebih baru	Menghitung daya listrik, energi listrik, dan faktor beban
3	Perangkat Lunak (Microsoft Word)	Versi 2016 atau lebih baru	Penyusunan proposal dan laporan penelitian
4	Kalkulator	Kalkulator ilmiah	Membantu perhitungan manual parameter kinerja
5	Alat Tulis	Buku catatan dan pena	Mencatat data dan hasil observasi lapangan

Tabel 3. 2Bahan Penelitian

No	Nama Bahan	Sumber	Keterangan
1	Data daya keluaran generator	Log sheet operasional PLTU	Digunakan untuk analisis daya listrik
2	Data tegangan dan arus	Panel kontrol / laporan operasi	Digunakan untuk perhitungan daya listrik
3	Data waktu operasi pembangkit	Catatan operasi PLTU	Digunakan untuk perhitungan energi listrik
4	Data kapasitas daya maksimum	Dokumen teknis PLTU	Acuan perhitungan faktor beban
5	Dokumen teknis dan operasional PLTU	Laporan operasional, log sheet, dan manual teknis	Sebagai data sekunder pendukung analisis
6	Data faktor daya (cos φ)	Panel kontrol / Log sheet generator	Digunakan dalam perhitungan daya aktif, daya reaktif, dan daya semu

3.7 Variabel dan Parameter Penelitian

Variabel yang dianalisis dalam penelitian ini merupakan indikator yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja PLTU, sedangkan parameter penelitian merupakan data operasional generator yang digunakan sebagai dasar perhitungan variabel penelitian.

Variabel penelitian meliputi:

1. Daya listrik yang dihasilkan (kW)
2. Energi listrik yang dihasilkan (kWh)
3. Faktor beban (*Load Factor*) (%)

Parameter penelitian meliputi:

1. Tegangan keluaran generator (Volt)
2. Arus keluaran generator (Ampere)
3. Faktor daya (*Power Factor* / cos φ)
4. Daya maksimum pembangkit (kW)
5. Waktu operasi pembangkit (jam)

Tabel 3. 3 Hubungan antar parameter dan variabel penelitian adalah sebagai berikut:

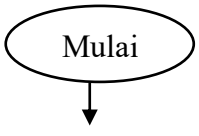
Parameter	**Digunakan untuk menghitung**
Tegangan (V)	Daya listrik (kW)
Arus (A)	Daya listrik (kW)
Faktor daya (cos φ)	Daya listrik (kW)
Daya listrik (kW)	Energi listrik (kWh)
Waktu operasi (jam)	Energi listrik (kWh)
Energi listrik (kWh)	Load Factor
Daya maksimum (kW)	Load Factor
Waktu operasi (jam)	Load Factor

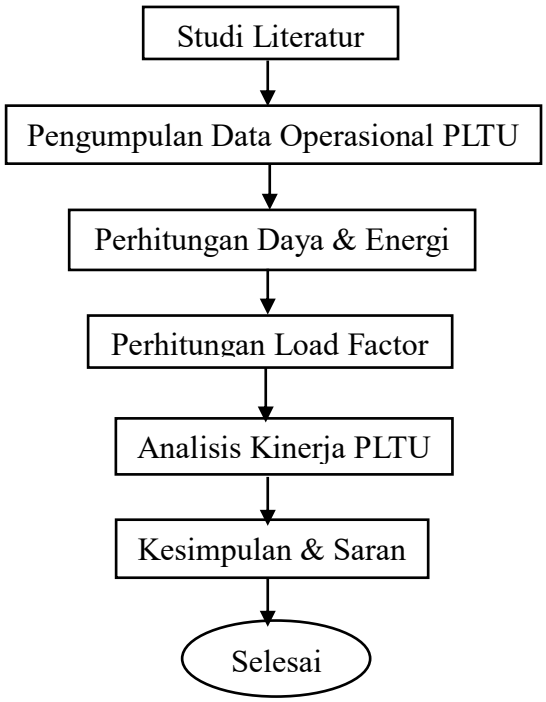
3.8 Tahapan Analisis Data

Tahapan analisis data dalam penelitian ini dilakukan sebagai berikut:

1. Mengumpulkan data operasional generator yang meliputi tegangan keluaran (V), arus (A), faktor daya (cos φ), waktu operasi (jam), serta daya maksimum generator.
2. Menghitung daya listrik generator berdasarkan data tegangan, arus, dan faktor daya menggunakan persamaan sistem tiga fasa.
3. Menghitung energi listrik yang dihasilkan berdasarkan nilai daya listrik dan waktu operasi.
4. Menentukan nilai daya maksimum yang digunakan sebagai acuan perhitungan.
5. Menghitung faktor beban *(load factor*) berdasarkan perbandingan daya rata-rata terhadap daya maksimum.
6. Menganalisis hasil perhitungan untuk menggambarkan kinerja PLTU dalam mendukung kebutuhan listrik pabrik.

3.9 Flowchart Penelitian





Gambar 3. 1Flowchart Penelitian

Flowchart Penelitian ini menggambarkan tahapan pelaksanaan penelitian yang dimulai dari studi literatur, pengumpulan data operasional PLTU, pengolahan dan perhitungan data, analisis kinerja pembangkit, hingga penarikan kesimpulan dan pemberian saran. Diagram alir penelitian disajikan dalam bentuk flowchart untuk mempermudah pemahaman alur penelitian.

3.10 Perhitungan Variabel Penelitian

3.10.1 Perhitungan Daya Listrik (Daya Aktif)

$$\boldsymbol{P = \sqrt{3} \times V \times I \times cos\phi}$$

Keterangan:

- P = Daya aktif (kW)
- V = Tegangan (Volt)
- I = Arus (Ampere)
- cosφ = Faktor daya

3.10.2 Perhitungan Energi Listrik

$$\boldsymbol{E = P \times t}$$

Dimana:

E = energi listrik (kWh)

P = daya listrik (kW)

t = waktu (jam)

3.10.3 Perhitungan Load Factor

$$\boldsymbol{LF = \frac{E}{P_{maks} \times t} \times 100\%}$$

Dimana:

E = Energi listrik yang dihasilkan (kWh)

P_{maks}= Daya maksimum pembangkit (kW)

t= Waktu operasi (jam)

3.11 Teknik Analisis Kinerja PLTU

Analisis kinerja PLTU dilakukan berdasarkan hasil perhitungan daya listrik yang dihasilkan (daya aktif), energi listrik, dan faktor beban (load factor). Perhitungan daya listrik dilakukan menggunakan data tegangan, arus, dan faktor daya generator sesuai persamaan sistem tiga fasa. Selanjutnya, hasil perhitungan dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan nilai yang diperoleh terhadap konsep sistem tenaga listrik yang telah dijelaskan pada Bab II. Analisis juga dilakukan untuk menjelaskan hubungan faktor daya terhadap daya listrik yang dihasilkan serta pengaruhnya terhadap energi listrik dan faktor beban sebagai indikator kinerja PLTU. Hasil analisis digunakan untuk mengevaluasi kemampuan PLTU dalam memenuhi kebutuhan energi listrik operasional pabrik.

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun

PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit (PKS) Sei Daun merupakan salah satu unit usaha pengolahan kelapa sawit yang berada di bawah naungan PT Perkebunan Nusantara IV. Pabrik ini berlokasi di Kabupaten Labuhan Batu Selatan, Provinsi Sumatera Utara, dan berfungsi sebagai unit pengolahan Tandan Buah Segar (TBS) menjadi minyak kelapa sawit mentah (*Crude Palm Oil/CPO*) serta inti sawit (*Palm Kernel*). Sebagai industri yang beroperasi secara berkesinambungan, PKS Sei Daun memerlukan pasokan energi listrik yang andal untuk menunjang seluruh proses produksi.

Untuk memenuhi kebutuhan energi listrik tersebut, PKS Sei Daun menggunakan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap **(**PLTU**)** yang beroperasi secara mandiri (*captive power plant*). Sistem pembangkit ini memanfaatkan limbah padat hasil pengolahan kelapa sawit berupa serat **(***fiber***)** dan cangkang **(***shell***)** sebagai bahan bakar utama boiler. Pemanfaatan biomassa tersebut tidak

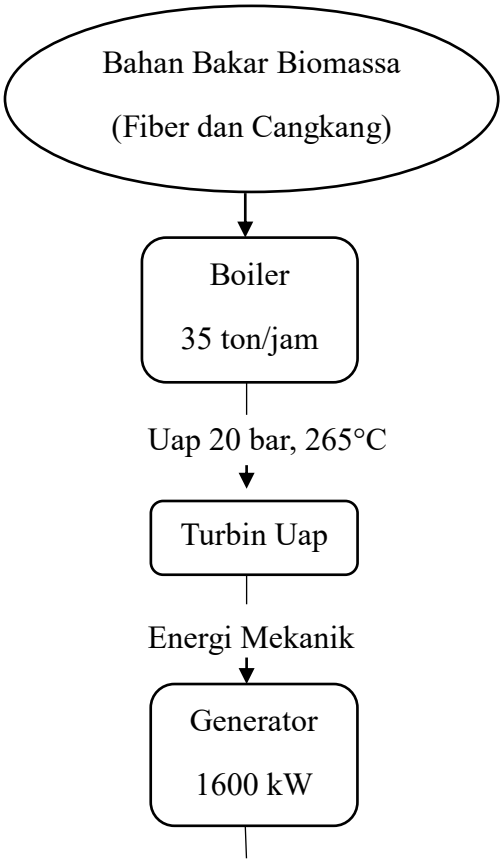
hanya mampu mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, tetapi juga mendukung pemanfaatan limbah industri sebagai sumber energi terbarukan sehingga lebih ramah terhadap lingkungan.

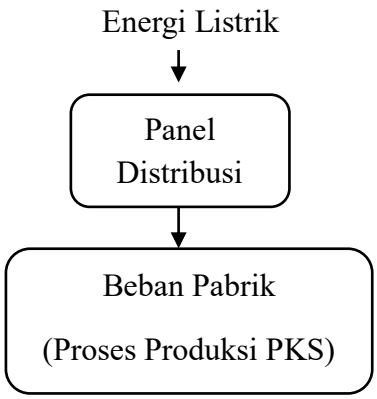
Berdasarkan data operasional perusahaan, PKS Sei Daun memiliki kapasitas pengolahan sebesar 50 ton Tandan Buah Segar (TBS) per jam. Untuk mendukung kapasitas tersebut, digunakan boiler berkapasitas 35 ton uap per jam dengan laju produksi uap (*steam flow*) sekitar 30 ton per jam. Uap bertekanan tinggi yang dihasilkan boiler digunakan untuk menggerakkan turbin uap yang terhubung langsung dengan generator sinkron sehingga menghasilkan energi listrik yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan operasional pabrik.

Energi listrik yang dihasilkan PLTU didistribusikan ke berbagai peralatan produksi, seperti stasiun perebusan (*sterilizer*), stasiun pengepresan (*press station*), stasiun klarifikasi, stasiun kernel, pompa, conveyor, serta peralatan pendukung lainnya. Selain digunakan sebagai penggerak generator, sebagian uap keluaran turbin juga dimanfaatkan kembali sebagai uap proses pada beberapa stasiun produksi melalui sistem turbin tekanan balik (*back pressure steam turbine*), sehingga pemanfaatan energi di pabrik menjadi lebih efisien.

Keandalan sistem PLTU memiliki peranan yang sangat penting dalam menjaga kelangsungan proses produksi. Apabila terjadi penurunan kinerja pembangkit, maka pasokan energi listrik ke peralatan produksi dapat terganggu dan berpotensi menurunkan produktivitas pabrik. Oleh karena itu, diperlukan analisis terhadap kinerja PLTU untuk mengetahui kemampuan pembangkit dalam menghasilkan daya listrik, memproduksi energi listrik, serta tingkat pemanfaatan kapasitas pembangkit melalui parameter daya keluaran**,** energi listrik, dan faktor beban **(*load factor*)**. Hasil analisis tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kondisi operasional PLTU di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun serta menjadi bahan evaluasi dalam upaya meningkatkan keandalan sistem pembangkitan listrik.

Gambar 4. 1 Diagram Alur Proses Pembangkitan Energi Listrik pada PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun





Sumber: Diolah penulis berdasarkan data operasional perusahaan

4.2 Sistem PLTU

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun merupakan sistem pembangkit yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dalam mendukung kegiatan operasional pabrik. Sistem pembangkitan ini bekerja melalui proses konversi energi secara bertahap, dimulai dari energi panas hasil pembakaran bahan bakar biomassa menjadi energi uap, kemudian energi mekanik pada turbin, hingga akhirnya dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator.

Secara umum, sistem PLTU pada PKS Sei Daun terdiri atas beberapa komponen utama yang saling terhubung, yaitu bahan bakar biomassa, boiler, turbin uap, generator, dan sistem distribusi listrik. Fiber dan cangkang hasil samping pengolahan kelapa sawit dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan panas pada boiler. Panas tersebut digunakan untuk menghasilkan uap yang selanjutnya menggerakkan turbin uap. Putaran turbin kemudian digunakan untuk menggerakkan generator sehingga menghasilkan energi listrik yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan operasional pabrik.

Berdasarkan sistem tersebut, pembahasan mengenai kondisi dan komponen PLTU di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun meliputi bahan bakar biomassa yang digunakan, sistem boiler, turbin uap, generator, serta proses

pembangkitan dan pemanfaatan energi listrik. Uraian setiap bagian tersebut disajikan pada subbab berikut.

4.2.1 Bahan Bakar Biomassa (Fiber dan Cangkang)

Sistem PLTU di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun memanfaatkan limbah padat hasil pengolahan kelapa sawit berupa fiber (serat) dan cangkang (shell) sebagai bahan bakar utama boiler. Fiber merupakan serat yang diperoleh dari proses pengepresan buah sawit, sedangkan cangkang berasal dari pemecahan biji sawit. Kedua biomassa tersebut memiliki nilai kalor yang cukup tinggi sehingga mampu menghasilkan energi panas yang diperlukan dalam proses pembentukan uap. Pemanfaatan fiber dan cangkang sebagai bahan bakar tidak hanya memenuhi kebutuhan energi pembangkit, tetapi juga mendukung pemanfaatan limbah secara optimal sehingga mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.

Tabel 4. 1 Spesifikasi Bahan Bakar Biomassa

No	Uraian	Satuan	Nilai
1	Jenis Biomassa	-	Fiber dan Cangkang
2	Kapasitas Olah PKS	kg/jam	50.000
3	Nilai Kalor Fiber	kcal/kg	4.000
4	Nilai Kalor Cangkang	kcal/kg	4.700
5	Persentase Fiber	% TBS	12,5
6	Persentase Cangkang	% TBS	4

Sumber: PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun

4.2.2 Boiler

Boiler yang digunakan pada PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun berfungsi sebagai penghasil uap yang digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Boiler memanfaatkan biomassa berupa *fiber* dan *shell* sebagai bahan bakar utama sehingga mampu mendukung konsep pemanfaatan limbah kelapa sawit sebagai sumber energi terbarukan. Berdasarkan data operasional perusahaan, boiler bekerja pada tekanan uap sekitar 20 kg/cm² untuk menghasilkan uap yang selanjutnya dialirkan menuju turbin uap. Keandalan boiler sangat penting karena kontinuitas produksi uap akan memengaruhi kinerja seluruh sistem pembangkit.

Tabel 4. 2 Spesifikasi Boiler Sistem PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun

No	Uraian Peralatan	Satuan	Kebutuhan
1	Boiler	-	Vickers
2	Kapasitas Boiler	Ton/jam	35
3	Tekanan Uap Boiler	Bar	20 bar
4	Temperatur Uap	°C	265
5	Steam Flow	Ton/jam	30
6	Bahan Bakar	-	Fiber & Shell

Sumber: PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun



Gambar 4. 2 Boiler PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun

Gambar 4.2 menunjukkan boiler yang digunakan pada sistem PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun. Boiler tersebut berfungsi menghasilkan uap bertekanan dari proses pembakaran biomassa berupa *fiber* dan *shell*. Uap yang dihasilkan kemudian digunakan sebagai penggerak turbin uap dalam proses pembangkitan energi listrik.

4.2.3 Turbin Uap

Turbin uap yang digunakan pada PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun berfungsi mengubah energi uap yang dihasilkan boiler menjadi energi mekanik berupa putaran poros. Uap bertekanan yang masuk ke turbin akan melewati sudu-sudu turbin sehingga menghasilkan putaran yang digunakan untuk menggerakkan generator. Turbin menjadi penghubung antara proses pembentukan uap pada boiler dan proses pembangkitan energi listrik pada generator.

Tabel 4. 3 Spesifikasi Turbin Uap Sistem PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun

No	Uraian Peralatan	Satuan	Kebutuhan

1	Turbin Uap	-	Back Pressure Steam Turbine
2	Kapasitas Turbin	Ton Uap/Jam	17

Sumber: PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun



Gambar 4. 3 Turbin Uap PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun

Gambar 4.3 menunjukkan turbin uap yang digunakan pada sistem PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun. Turbin menerima suplai uap dari boiler dan mengubah energi uap tersebut menjadi energi mekanik berupa putaran poros yang kemudian diteruskan ke generator untuk menghasilkan energi listrik.

4.2.4 Generator

Generator merupakan komponen utama yang menghasilkan energi listrik pada sistem PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun. Generator digerakkan langsung oleh putaran turbin uap dan menghasilkan energi listrik tiga fasa yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik seluruh unit produksi di pabrik. Dalam penelitian ini, data operasional generator seperti tegangan, arus, faktor daya (*power factor*), serta waktu operasi digunakan sebagai dasar perhitungan daya listrik, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*).

Tabel 4. 4 Spesifikasi Generator Sistem PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun

No	Uraian Peralatan	Satuan	Kebutuhan
1	Generator	-	Sinkron 3 fasa
2	Kapasitas Generator	KW	1600
3	Tegangan Generator	VOLT	380
4	Arus Generator	Amp	1700

5	Frekuensi	Hz	50
6	Faktor Daya (Cos φ)	Cos φ	0,9
7	RPM	Rpm	1500

Sumber: PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun



Gambar 4. 4 Generator PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun

Gambar 4.4 menunjukkan generator yang digunakan pada sistem PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun. Generator berfungsi mengubah energi mekanik yang berasal dari putaran turbin menjadi energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan kemudian disalurkan ke sistem distribusi internal pabrik untuk mendukung seluruh kegiatan operasional.

4.3 Data Operasional PLTU

Data operasional PLTU merupakan data yang diperoleh dari kondisi aktual sistem pembangkitan listrik di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun. Data tersebut digunakan untuk memberikan gambaran mengenai kondisi operasi masing-masing komponen utama PLTU serta menjadi dasar dalam melakukan analisis kinerja pembangkit.

Data operasional yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data bahan bakar biomassa, boiler, turbin uap, dan generator. Parameter yang diperoleh mencakup kapasitas pengolahan pabrik, kapasitas dan kondisi operasi boiler, penggunaan uap, spesifikasi turbin, serta parameter kelistrikan generator. Selanjutnya, data operasional generator berupa tegangan, arus, faktor daya, dan waktu operasi digunakan sebagai dasar dalam perhitungan daya listrik, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*).

Penyajian data operasional secara bertahap bertujuan untuk memberikan gambaran mengenai hubungan antarbagian dalam sistem PLTU, mulai dari

pemanfaatan bahan bakar biomassa untuk menghasilkan uap hingga proses pembangkitan energi listrik oleh generator. Data operasional tersebut kemudian disajikan pada subbab berikut sesuai dengan masing-masing komponen sistem PLTU.

4.3.1 Data Bahan Bakar Biomassa (Fiber dan Shell)

Bahan bakar merupakan salah satu komponen penting dalam sistem PLTU karena energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran digunakan untuk menghasilkan uap di dalam boiler. Pada PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun, bahan bakar yang digunakan berasal dari limbah biomassa hasil pengolahan kelapa sawit, yaitu *fiber* dan *shell* atau cangkang.

Untuk mengetahui kondisi operasional pembangkitan yang berkaitan dengan penggunaan bahan bakar biomassa, diperlukan beberapa data pendukung, seperti kapasitas pengolahan pabrik, kapasitas boiler, laju aliran uap aktual (*steam flow*), dan efisiensi boiler. Data tersebut diperoleh dari kondisi operasional PLTU di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun dan disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Data Bahan Bakar Biomassa (Fiber dan Shell)

No	Parameter	Satuan	Nilai
1	Kapasitas Olah PKS	kg/jam	50.000
2	Kapasitas Boiler	kg/jam	35.000
3	Steam Flow Aktual	kg/jam	30.000
4	Efisiensi Boiler	%	75

Sumber: PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun

Berdasarkan Tabel 4.5, kapasitas pengolahan PKS Sei Daun sebesar 50.000 kg/jam menunjukkan jumlah Tandan Buah Segar (TBS) yang dapat diolah setiap jam. Dengan kapasitas tersebut, proses pengolahan menghasilkan limbah biomassa berupa *fiber* dan *shell* yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar utama boiler.

Boiler yang digunakan memiliki kapasitas sebesar 35.000 kg/jam, sedangkan laju produksi uap aktual (*steam flow*) sebesar 30.000 kg/jam. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa boiler belum beroperasi pada kapasitas

maksimumnya dan masih memiliki cadangan kapasitas sebesar 5.000 kg/jam atau sekitar 14,3% dari kapasitas terpasang.

Selain itu, data efisiensi boiler sebesar 75% menunjukkan tingkat kemampuan boiler dalam mengonversi energi panas hasil pembakaran biomassa menjadi energi uap. Energi uap tersebut selanjutnya digunakan untuk menggerakkan turbin yang terhubung dengan generator dalam menghasilkan energi listrik.

4.3.2 Data Boiler

Boiler merupakan salah satu komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berfungsi menghasilkan uap bertekanan dan bertemperatur tinggi. Uap yang dihasilkan oleh boiler selanjutnya digunakan untuk memutar turbin uap. Energi mekanik dari putaran turbin kemudian diteruskan ke generator untuk menghasilkan energi listrik.

Boiler yang digunakan di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun menggunakan biomassa berupa fiber dan cangkang sebagai bahan bakar utama. Data spesifikasi dan kondisi operasional boiler diperlukan dalam penelitian ini untuk memberikan gambaran mengenai kemampuan boiler dalam menghasilkan uap yang digunakan pada proses pembangkitan listrik. Adapun data boiler yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Data Boiler

No	Parameter	Satuan	Nilai
1	Jenis Boiler	-	Water Tube Boiler
2	Kapasitas Boiler	ton/jam	35
3	Tekanan Uap	bar	20
4	Temperatur Uap	°C	265
5	Jenis Bahan Bakar	-	Fiber dan Cangkang

Sumber: PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun.

Berdasarkan Tabel 4.6, boiler yang digunakan merupakan jenis *water tube boiler* dengan kapasitas produksi uap sebesar 35 ton/jam. Boiler tersebut beroperasi dengan tekanan uap sebesar 20 bar dan temperatur uap sebesar 265°C. Kondisi operasi tersebut menunjukkan bahwa boiler berfungsi menghasilkan uap dengan tekanan dan temperatur yang diperlukan untuk menggerakkan turbin uap.

Bahan bakar yang digunakan berupa fiber dan cangkang yang merupakan biomassa hasil samping dari proses pengolahan kelapa sawit. Energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran biomassa digunakan untuk memanaskan air di dalam boiler hingga menghasilkan uap. Selanjutnya, uap tersebut dialirkan menuju turbin untuk menghasilkan energi mekanik yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik oleh generator.

4.3.3 Data Generator

Generator merupakan salah satu komponen utama dalam sistem PLTU yang berfungsi mengubah energi mekanik dari putaran turbin uap menjadi energi listrik. Data generator diperlukan dalam penelitian ini sebagai dasar untuk menganalisis kinerja sistem pembangkitan, khususnya dalam perhitungan daya aktif, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*).

Parameter operasional generator yang digunakan dalam penelitian meliputi kapasitas generator, tegangan nominal, arus nominal, frekuensi, faktor daya (*cos φ*), kecepatan putaran, dan waktu operasi. Data spesifikasi dan operasional generator yang digunakan pada PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun disajikan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Data Generator

No	Parameter	Satuan	Nilai
1	Kapasitas Generator	kW	1600
2	Tegangan Nominal	Volt	380
3	Arus Nominal	Ampere	1700
4	Frekuensi	Hz	50
5	Faktor Daya (Cos φ)	-	0,9
6	Kecepatan Putaran	rpm	1500
7	Waktu Operasi	Jam/hari	24

Sumber: PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun.

Berdasarkan Tabel 4.7, generator yang digunakan memiliki kapasitas terpasang sebesar 1600 kW dengan tegangan nominal 380 Volt dan arus nominal 1700 Ampere. Generator beroperasi pada frekuensi 50 Hz dengan faktor daya 0,9 dan kecepatan putaran 1500 rpm. Dalam kondisi normal, generator beroperasi selama 24 jam untuk memenuhi kebutuhan energi listrik pada proses produksi pabrik.

4.4 Perhitungan Bahan Bakar Biomassa

Perhitungan bahan bakar biomassa dilakukan untuk mengetahui kebutuhan bahan bakar boiler dalam menghasilkan uap yang digunakan pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun. Bahan bakar yang digunakan dalam proses pembakaran boiler berasal dari limbah padat hasil pengolahan Tandan Buah Segar (TBS), yaitu fiber dan cangkang (*shell*).

Perhitungan dilakukan berdasarkan kapasitas pengolahan pabrik, jumlah uap aktual yang dihasilkan (*steam flow*), nilai kalor bahan bakar, nilai kalor uap, serta efisiensi boiler. Selain itu, dilakukan pula perhitungan mengenai jumlah biomassa yang dihasilkan dari proses pengolahan TBS, jumlah biomassa yang digunakan sebagai bahan bakar, dan sisa biomassa yang tersedia.

Data dan hasil perhitungan kebutuhan bahan bakar biomassa pada sistem PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun disajikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Perhitungan Bahan Bakar Biomassa

Kapasitas Olah PKS Sei Daun			50.000	kg/jam
Kapasitas Boiler Vickers Kap. 35 ton/h			35.000	kg/jam
Steam Flow Real (Jumlah Steam Yang Dihasilkan)			30.000	kg/jam
Nilai Kalor Fiber			4.000	Kcal/kg
Nilai Kalor Cangkang			4.700	Kcal/kg
Nilai Kalor Uap			550	Kcal/kg uap
Kebutuhan Panas =	Steam Flow x Nilai Kalor Uap	=30.000 x 550	16.500.000	Kcal/jam uap
Efisiensi Boiler			75%	
Kebutuhan Bahan Bakar Fibre	$\frac{Kebutuhan\ Panas}{(Nilai\ Kalor\ Fibre\ x\ Eff.Boiler)}$	$\frac{16.500.000}{(4.000\ \times 75\%)}$	5.500	Kg/jam

Jumlah Bahan Bakar yang dihasilkan per Jam				
Fibre =	Kap. PKS X Mass Balance Fibre	= 50.000 x 12,5%	6.250	kg/jam
Shell =	Kap. PKS X Mass Balance Fibre	= 50.000 x 4%	2.000	kg/jam
Total =			8.250	kg/jam
Perbandingan Pemakaian Bahan Bakar				
Fibre =	Jumlah Fibre/jam x 80%	=6.250 x 80%	5.000	kg/jam
Shell =	Jumlah Shell/jam x 20%	= 2.000 x 20%	400	kg/jam
Total =			5.400	kg/jam
Sisa Bahan Bakar (Teori)				
Fibre =	Jumlah Fibre dihasilkan – Pemakaian		1.250	kg/jam
Shell =	Jumlah Shell dihasilkan – Pemakaian		1.600	kg/jam
Total =			**2.850**	**kg/jam**

Sumber: PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun.

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh kebutuhan bahan bakar teoritis sebesar 5.500 kg/jam, sedangkan biomassa yang tersedia dari hasil pengolahan TBS mencapai 8.250 kg/jam. Hal ini menunjukkan bahwa pasokan biomassa di PKS Sei Daun mampu memenuhi kebutuhan pembakaran boiler dengan masih tersedianya cadangan bahan bakar sebesar 2.850 kg/jam. Ketersediaan bahan bakar tersebut memungkinkan boiler menghasilkan uap sebesar 30 ton/jam pada tekanan 20 bar dan temperatur 265°C secara kontinu, sehingga mampu memasok energi uap yang diperlukan turbin untuk menggerakkan generator dalam menghasilkan energi listrik.

4.5 Perhitungan Daya Listrik

Perhitungan daya listrik dilakukan untuk mengetahui besarnya daya aktif yang dihasilkan oleh generator pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun. Data operasional generator yang digunakan dalam perhitungan ditunjukkan pada Tabel 4.4 Daya aktif generator tiga fasa dihitung menggunakan persamaan (4.1):

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi$$

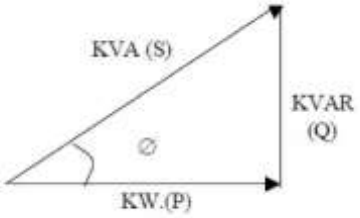
Substitusi nilai:

$$P = 1{,}732 \times 380 \times 1700 \times 0{,}9$$

$$P = 1.007.345\ W$$

$$P = 1007{,}35\ kW$$

Jadi daya aktif yang dihasilkan generator adalah sebesar: $1007{,}35\ kW$



Gambar 4. 5 Segitiga Daya (Power Triangle)

4.5.1 Perhitungan Daya Semu (S) berdasarkan persamaan (4.2) yaitu:

$$S = \sqrt{3} \times V \times I$$
$$S = 1{,}732 \times 380 \times 1700$$
$$S = 1119{,}27\ kVA$$

4.5.2 Perhitungan Daya Reaktif (Q) berdasarkan persamaan (4.3) yaitu:

Berdasarkan data spesifikasi generator, faktor daya yang digunakan adalah:

$$\cos\phi = 0{,}9$$

Untuk memperoleh nilai sin φ digunakan persamaan:

$$\sin\phi = \sqrt{1 - \cos^2}$$
$$\sin\phi = \sqrt{1 - 0{,}9^2}$$
$$\sin\phi = 0{,}4359$$

Selanjutnya, daya reaktif dihitung dengan persamaan:

$$Q = S \times \sin\phi$$
$$Q = 1119{,}27 \times 0{,}4359$$
$$Q = 487{,}87\ kVAR$$

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh daya aktif generator sebesar 1007,35 kW dengan daya semu sebesar 1119,27 kVA dan daya reaktif sebesar 487,87 kVAR. Nilai faktor daya sebesar 0,90 menunjukkan bahwa generator mampu mengubah sekitar 90% daya semu menjadi daya aktif yang dapat

dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan listrik pabrik. Semakin tinggi nilai faktor daya, maka semakin efisien proses konversi energi listrik yang dihasilkan generator.

4.5.1 Analisis Faktor Daya Generator

Nilai faktor daya (power factor) generator sebesar 0,90 menunjukkan bahwa generator bekerja pada kondisi operasi yang baik. Dalam sistem tenaga listrik, faktor daya menunjukkan kemampuan generator dalam mengubah daya semu (apparent power) menjadi daya aktif (active power) yang dapat dimanfaatkan oleh beban. Semakin besar nilai faktor daya atau mendekati satu, maka semakin tinggi pula efisiensi pemanfaatan energi listrik yang dihasilkan.

Pada penelitian ini diperoleh nilai faktor daya sebesar 0,90, yang berarti sekitar 90% daya semu berhasil dikonversi menjadi daya aktif, sedangkan sisanya merupakan daya reaktif yang diperlukan untuk membentuk medan magnet pada generator dan peralatan induktif lainnya. Nilai tersebut menunjukkan bahwa generator masih bekerja dalam batas operasi normal sehingga rugi-rugi daya akibat arus reaktif relatif kecil.

Selain itu, faktor daya yang tinggi menyebabkan arus generator menjadi lebih kecil dibandingkan apabila faktor daya rendah untuk menghasilkan daya aktif yang sama. Kondisi tersebut dapat mengurangi rugi-rugi tembaga *(copper losses)* pada kumparan generator, menurunkan kenaikan temperatur peralatan, serta meningkatkan efisiensi sistem pembangkitan. Dengan demikian, generator mampu menghasilkan energi listrik secara lebih stabil dan ekonomis.

Apabila nilai faktor daya mengalami penurunan, maka arus generator akan meningkat sehingga rugi-rugi daya juga semakin besar. Kondisi tersebut dapat menyebabkan penurunan efisiensi generator, meningkatnya pemanasan kumparan, serta mempercepat penurunan umur isolasi peralatan listrik. Oleh karena itu, pengaturan sistem eksitasi generator perlu dijaga agar faktor daya tetap berada pada kisaran operasi yang direkomendasikan.

Berdasarkan hasil analisis tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai faktor daya sebesar 0,90 menunjukkan generator PLTU PT Perkebunan Nusantara IV

Regional I PKS Sei Daun bekerja secara efisien dan masih memiliki kemampuan yang baik dalam memasok kebutuhan energi listrik operasional pabrik.

4.6 Perhitungan Energi Listrik

Energi listrik merupakan hasil perkalian antara daya aktif dengan waktu operasi generator.

Energi listrik dihitung menggunakan persamaan (4.4):

$$E = P \times t$$

Substitusi nilai:

$$E = 1007{,}35 \times 24$$

$$E = 24.176{,}4\ kWh$$

Jadi energi listrik yang dihasilkan selama 24 jam operasi adalah: $24.176{,}4\ kWh$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa generator mampu menghasilkan energi listrik sebesar 24.176,4 kWh dalam satu hari operasi. Besarnya energi listrik dipengaruhi oleh daya aktif yang dihasilkan generator dan lamanya waktu operasi. Karena generator beroperasi secara kontinu selama 24 jam, energi listrik yang dihasilkan mampu memenuhi kebutuhan operasional proses produksi di pabrik kelapa sawit.

4.7 Perhitungan Load Factor

Faktor beban dihitung menggunakan persamaan (4.5):

$$LF = \frac{E}{P_{maks} \times t}$$

Substitusi nilai:

$$LF = \frac{24.176{,}4}{1600 \times 24}$$

$$LF = \frac{24.176{,}4}{38.400}$$

$$LF = 0{,}6296$$

$$LF = 62{,}96\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai load factor sebesar 62,96%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa selama periode operasi, generator

memanfaatkan sekitar 63% dari kapasitas maksimum sebesar 1600 kW. Kondisi ini menunjukkan bahwa generator tidak bekerja pada beban penuh sehingga masih tersedia cadangan kapasitas apabila terjadi peningkatan kebutuhan listrik. Pengoperasian generator pada kondisi tersebut juga dapat membantu menjaga keandalan sistem dan mengurangi risiko penurunan umur peralatan akibat pembebanan yang berlebihan.

4.8 Pembahasan

Bagian ini membahas hasil analisis kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun berdasarkan data operasional yang telah diperoleh. Pembahasan dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem pembangkitan melalui analisis daya listrik yang dihasilkan generator, energi listrik yang dihasilkan selama waktu operasi, serta faktor beban (*load factor*) generator.

Analisis tersebut dilakukan berdasarkan parameter operasional generator, seperti tegangan, arus, faktor daya ($cos\ \varphi$), kapasitas generator, dan waktu operasi. Hasil perhitungan selanjutnya digunakan untuk menggambarkan kemampuan generator dalam memenuhi kebutuhan energi listrik pada proses operasional pabrik. Dengan demikian, pembahasan ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kondisi dan kinerja sistem PLTU di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun.

4.8.1 Analisis Daya Listrik (Daya Aktif)

Daya aktif merupakan daya listrik yang benar-benar dimanfaatkan untuk melakukan kerja pada beban listrik. Pada sistem PLTU di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun, daya aktif yang dihasilkan generator digunakan untuk menyuplai berbagai peralatan produksi, seperti motor listrik, pompa, conveyor, sterilizer, press station, stasiun klarifikasi, serta peralatan pendukung lainnya. Oleh karena itu, besarnya daya aktif yang dihasilkan generator menjadi salah satu indikator utama dalam menilai kemampuan sistem pembangkit dalam memenuhi kebutuhan energi listrik operasional pabrik.

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan persamaan daya tiga fasa diperoleh daya aktif generator sebesar 1007,35 kW. Nilai tersebut diperoleh dari

parameter operasi generator yang meliputi tegangan sebesar 380 Volt**,** arus sebesar 1700 Ampere, dan faktor daya (cos φ) sebesar 0,90**.** Besarnya daya aktif tersebut menunjukkan kemampuan generator dalam mengubah energi mekanik yang berasal dari putaran turbin uap menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan secara langsung oleh beban.

Apabila dibandingkan dengan kapasitas terpasang generator sebesar 1600 kW**,** maka daya aktif yang dihasilkan hanya sekitar 62,96% dari kapasitas maksimum generator. Kondisi ini menunjukkan bahwa generator tidak bekerja pada beban penuh (*full load*), melainkan masih memiliki cadangan kapasitas sekitar 37,04%**.** Ketersediaan cadangan kapasitas tersebut memberikan keuntungan dalam operasional pembangkit karena generator masih mampu mengakomodasi peningkatan kebutuhan daya apabila sewaktu-waktu terjadi kenaikan beban listrik selama proses produksi berlangsung.

Pengoperasian generator pada beban yang tidak mencapai kapasitas maksimum juga memberikan dampak positif terhadap keandalan sistem. Beban yang berada di bawah kapasitas nominal menyebabkan temperatur kerja generator relatif lebih stabil sehingga risiko terjadinya pemanasan berlebih (*overheating*) pada kumparan stator maupun rotor dapat dikurangi. Selain itu, tegangan keluaran generator cenderung lebih stabil sehingga kualitas energi listrik yang disalurkan kepada peralatan produksi tetap terjaga. Kondisi tersebut sangat penting mengingat sebagian besar peralatan di pabrik kelapa sawit menggunakan motor induksi yang membutuhkan suplai tegangan yang stabil agar dapat bekerja secara optimal.

Dari sisi operasional pabrik, daya aktif sebesar 1007,35 kW menunjukkan bahwa sistem PLTU mampu menyediakan energi listrik yang cukup untuk mendukung aktivitas produksi secara berkelanjutan. Selama generator mampu menghasilkan daya aktif sesuai kebutuhan beban, proses pengolahan Tandan Buah Segar (TBS) menjadi Crude Palm Oil (CPO) dan inti sawit dapat berlangsung tanpa gangguan akibat kekurangan pasokan listrik. Dengan demikian, kontinuitas produksi dapat dipertahankan sehingga produktivitas pabrik tetap terjaga.

Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa daya aktif sangat dipengaruhi oleh nilai tegangan, arus, dan faktor daya generator sebagaimana dijelaskan pada Bab II. Berdasarkan persamaan

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi$$

dapat diketahui bahwa peningkatan salah satu parameter tersebut akan meningkatkan daya aktif yang dihasilkan selama parameter lainnya tetap. Sebaliknya, apabila terjadi penurunan tegangan, arus, atau faktor daya, maka daya aktif generator juga akan mengalami penurunan. Oleh karena itu, kestabilan parameter operasi generator menjadi faktor penting dalam menjaga kinerja sistem pembangkitan.

Selain dipengaruhi oleh parameter kelistrikan generator, besarnya daya aktif juga dipengaruhi oleh kondisi operasi boiler dan turbin uap. Boiler harus mampu menghasilkan uap dengan tekanan dan temperatur yang sesuai agar turbin memperoleh energi yang cukup untuk menghasilkan putaran sebesar 1500 rpm. Putaran turbin yang stabil akan menghasilkan putaran generator yang konstan sehingga daya aktif yang dihasilkan tetap berada pada nilai yang diharapkan. Apabila terjadi penurunan tekanan uap, temperatur uap, maupun laju aliran uap (*steam flow*), maka energi mekanik yang diterima generator juga akan menurun sehingga daya aktif yang dihasilkan menjadi lebih kecil.

Ditinjau dari teori yang telah dijelaskan pada Bab II, hasil penelitian ini menunjukkan kesesuaian dengan konsep sistem tenaga listrik tiga fasa, yaitu bahwa daya aktif merupakan komponen daya yang benar-benar dimanfaatkan oleh beban untuk menghasilkan kerja. Nilai daya aktif sebesar 1007,35 kW yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa sebagian besar energi listrik yang dihasilkan generator telah dapat dimanfaatkan untuk menunjang kebutuhan operasional pabrik. Kondisi tersebut juga didukung oleh nilai faktor daya yang tinggi sehingga proses konversi daya semu menjadi daya aktif berlangsung secara efisien.

Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa daya aktif sebesar 1007,35 kW menunjukkan generator PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun bekerja dalam kondisi operasi yang baik. Daya yang dihasilkan telah mampu memenuhi kebutuhan energi listrik pabrik, masih

memiliki cadangan kapasitas untuk mengantisipasi peningkatan beban, serta mendukung keandalan sistem pembangkitan sehingga kontinuitas proses produksi dapat tetap terjaga.

4.8.2 Analisis Daya Semu

Daya semu (*apparent power*) merupakan total daya yang disuplai oleh generator pada sistem tenaga listrik tiga fasa. Daya semu merupakan gabungan antara daya aktif (*active power*) dan daya reaktif (*reactive power*) yang menunjukkan kapasitas total generator dalam memasok energi listrik kepada beban. Berbeda dengan daya aktif yang dimanfaatkan untuk melakukan kerja nyata, daya semu menggambarkan kemampuan keseluruhan generator dalam menyalurkan daya listrik selama proses operasi berlangsung. Oleh karena itu, analisis daya semu penting dilakukan untuk mengetahui tingkat pembebanan generator terhadap kapasitas yang dimilikinya.

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan persamaan sistem tiga fasa diperoleh nilai daya semu generator sebesar 1119,27 kVA. Nilai tersebut dihitung berdasarkan tegangan keluaran generator sebesar 380 Volt dan arus sebesar 1700 Ampere. Besarnya daya semu menunjukkan bahwa selama operasi generator harus menyediakan kapasitas sebesar 1119,27 kVA untuk memenuhi kebutuhan daya aktif dan daya reaktif pada sistem kelistrikan pabrik.

Apabila dibandingkan dengan kapasitas generator sebesar 1600 kW, nilai daya semu yang dihasilkan masih berada di bawah kemampuan maksimum generator. Kondisi ini menunjukkan bahwa generator masih memiliki cadangan kapasitas yang cukup sehingga belum mengalami pembebanan penuh. Cadangan kapasitas tersebut sangat penting dalam menjaga keandalan sistem, terutama apabila terjadi peningkatan kebutuhan listrik pada saat proses produksi berlangsung atau ketika beberapa peralatan listrik beroperasi secara bersamaan.

Besarnya daya semu dipengaruhi secara langsung oleh nilai tegangan dan arus generator. Berdasarkan persamaan

$$S = \sqrt{3} \times V \times I$$

dapat diketahui bahwa peningkatan tegangan maupun arus akan menyebabkan daya semu yang dihasilkan generator juga meningkat. Oleh karena itu, kestabilan tegangan dan arus selama operasi pembangkit menjadi faktor yang sangat penting

dalam menjaga kemampuan generator untuk memasok energi listrik secara kontinu. Apabila salah satu parameter tersebut mengalami penurunan akibat gangguan pada sistem pembangkitan, maka kemampuan generator dalam menyalurkan daya listrik juga akan ikut berkurang.

Hubungan antara daya semu dengan faktor daya (*power factor*) juga sangat erat. Pada penelitian ini diperoleh nilai faktor daya sebesar 0,90, yang berarti sebagian besar daya semu berhasil dikonversi menjadi daya aktif. Dari total daya semu sebesar 1119,27 kVA, daya aktif yang dapat dimanfaatkan sebesar 1007,35 kW, sedangkan sisanya berupa daya reaktif sebesar 487,87 kVAR yang diperlukan untuk membentuk medan magnet pada generator dan beban induktif. Nilai faktor daya yang tinggi menunjukkan bahwa pemanfaatan daya semu berlangsung secara efisien karena proporsi daya aktif lebih besar dibandingkan daya reaktif.

Apabila nilai faktor daya mengalami penurunan, maka untuk menghasilkan daya aktif yang sama generator harus menyuplai daya semu yang lebih besar. Kondisi tersebut menyebabkan arus generator meningkat sehingga rugi-rugi daya pada penghantar dan kumparan generator juga akan bertambah. Akibatnya efisiensi sistem pembangkitan menjadi menurun dan umur peralatan dapat berkurang karena bekerja pada kondisi pembebanan yang lebih berat. Oleh sebab itu, menjaga nilai faktor daya tetap tinggi merupakan salah satu upaya untuk meningkatkan efisiensi operasi generator.

Hasil penelitian ini sejalan dengan teori yang dijelaskan pada Bab II, yaitu bahwa daya semu merupakan representasi kapasitas total generator dalam menyuplai daya listrik pada sistem tenaga. Nilai daya semu sebesar 1119,27 kVA menunjukkan bahwa generator di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun masih bekerja dalam batas operasi yang aman serta mampu memenuhi kebutuhan energi listrik operasional pabrik tanpa mengalami pembebanan yang berlebihan.

Berdasarkan hasil analisis tersebut dapat disimpulkan bahwa daya semu sebesar 1119,27 kVA menunjukkan kemampuan generator dalam memasok daya listrik secara optimal. Nilai tersebut didukung oleh faktor daya sebesar **0,90**, sehingga sebagian besar kapasitas generator berhasil dimanfaatkan sebagai daya aktif yang

berguna bagi proses produksi. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem pembangkitan memiliki tingkat pemanfaatan kapasitas yang baik serta masih memiliki cadangan daya yang dapat digunakan apabila terjadi peningkatan kebutuhan listrik di masa mendatang.

4.8.3 Analisis Daya Reaktif

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai daya reaktif (Q) generator sebesar 487,87 kVAR. Nilai tersebut diperoleh dari hubungan antara daya semu dan sudut faktor daya menggunakan persamaan

$$Q = S \times \sin \varphi.$$

Daya reaktif merupakan komponen daya listrik yang tidak secara langsung menghasilkan kerja mekanis maupun energi yang dapat dimanfaatkan oleh beban. Meskipun demikian, keberadaan daya reaktif sangat penting dalam sistem tenaga listrik karena berfungsi membentuk medan magnet pada generator, transformator, dan peralatan listrik induktif lainnya sehingga proses konversi energi listrik dapat berlangsung secara normal.

Pada generator sinkron yang digunakan di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun, daya reaktif diperlukan untuk menghasilkan medan magnet pada kumparan rotor melalui sistem eksitasi. Medan magnet tersebut kemudian berinteraksi dengan kumparan stator sehingga menghasilkan tegangan listrik tiga fasa. Dengan demikian, meskipun daya reaktif tidak menghasilkan kerja nyata sebagaimana daya aktif, keberadaannya tetap menjadi syarat utama agar generator mampu menghasilkan energi listrik secara kontinu. Tanpa adanya daya reaktif yang cukup, generator tidak dapat membentuk fluks magnet yang diperlukan untuk menghasilkan tegangan keluaran yang stabil.

Nilai daya reaktif sebesar 487,87 kVAR menunjukkan bahwa sebagian kapasitas generator digunakan untuk memenuhi kebutuhan pembentukan medan magnet. Nilai tersebut masih berada pada kondisi yang wajar apabila

dibandingkan dengan daya semu generator sebesar 1119,27 kVA dan daya aktif sebesar 1007,35 kW. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar kapasitas generator tetap dimanfaatkan sebagai daya aktif yang menghasilkan kerja nyata, sedangkan sebagian lainnya digunakan untuk mempertahankan kestabilan medan magnet selama generator beroperasi.

Besarnya daya reaktif dipengaruhi oleh nilai faktor daya (power factor). Pada penelitian ini diketahui bahwa faktor daya generator adalah 0,90, sehingga kebutuhan daya reaktif masih relatif rendah dibandingkan daya aktif. Semakin tinggi nilai faktor daya, maka sudut fase antara tegangan dan arus akan semakin kecil sehingga komponen daya reaktif juga semakin berkurang. Sebaliknya, apabila faktor daya menurun maka sudut fase akan semakin besar sehingga kebutuhan daya reaktif meningkat. Kondisi tersebut menyebabkan arus generator menjadi lebih besar walaupun daya aktif yang dihasilkan tetap sama.

Peningkatan daya reaktif akan berdampak langsung terhadap pembebanan generator. Ketika generator harus menyuplai daya reaktif dalam jumlah besar, arus yang mengalir pada kumparan stator juga meningkat. Arus yang lebih besar akan menyebabkan rugi-rugi tembaga (*copper losses*) bertambah karena besarnya rugi-rugi sebanding dengan kuadrat arus (I^2R). Akibatnya, temperatur kumparan generator meningkat sehingga efisiensi kerja generator menurun. Apabila kondisi tersebut berlangsung secara terus-menerus, maka umur isolasi kumparan generator dapat berkurang dan risiko kerusakan peralatan menjadi lebih besar.

Selain memengaruhi rugi-rugi daya, besarnya daya reaktif juga berpengaruh terhadap kestabilan tegangan generator. Beban induktif seperti motor listrik, pompa, conveyor, blower, dan transformator memerlukan suplai daya reaktif agar dapat membentuk medan magnet selama beroperasi. Apabila kebutuhan daya reaktif terlalu tinggi sedangkan kemampuan generator terbatas, maka tegangan keluaran generator cenderung mengalami penurunan (*voltage drop*). Penurunan tegangan tersebut dapat mengganggu kinerja motor listrik dan menyebabkan proses produksi di pabrik tidak berjalan secara optimal.

Pada sistem PLTU PKS Sei Daun, hampir seluruh beban listrik bersifat induktif karena sebagian besar energi listrik digunakan untuk mengoperasikan motor-motor listrik pada stasiun sterilizer, press, klarifikasi, kernel, pompa, dan

conveyor. Oleh karena itu, keberadaan daya reaktif menjadi sangat penting agar seluruh peralatan tersebut dapat bekerja secara normal. Meskipun tidak menghasilkan energi yang dimanfaatkan secara langsung, daya reaktif berperan dalam menjaga kontinuitas operasi seluruh sistem tenaga listrik di pabrik.

Kebutuhan daya reaktif pada generator sinkron dikendalikan melalui sistem eksitasi. Sistem eksitasi berfungsi mengatur arus medan pada rotor sehingga besar kecilnya tegangan keluaran generator dapat dipertahankan sesuai kondisi operasi. Ketika beban induktif meningkat, sistem eksitasi akan menambah arus medan sehingga generator mampu menyuplai daya reaktif yang dibutuhkan sistem. Sebaliknya, apabila beban induktif berkurang maka arus eksitasi dapat diturunkan sehingga generator tidak menghasilkan daya reaktif secara berlebihan. Dengan demikian, pengaturan eksitasi merupakan salah satu faktor penting dalam menjaga kestabilan tegangan dan faktor daya generator.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa generator masih mampu menghasilkan daya reaktif sebesar 487,87 kVAR dengan faktor daya 0,90, sehingga kebutuhan medan magnet seluruh sistem masih dapat dipenuhi tanpa menyebabkan penurunan efisiensi yang signifikan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa generator bekerja dalam kondisi operasi yang stabil dan masih memiliki kemampuan yang cukup untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif beban di lingkungan pabrik.

Jika dibandingkan dengan kapasitas generator sebesar 1600 kW, nilai daya reaktif yang diperoleh masih menunjukkan bahwa generator belum mengalami pembebanan berlebih (*overload*). Hal ini memberikan keuntungan karena generator masih memiliki cadangan kapasitas untuk mengantisipasi peningkatan kebutuhan daya reaktif apabila terjadi penambahan beban listrik selama proses produksi. Dengan adanya cadangan kapasitas tersebut, keandalan sistem pembangkitan dapat dipertahankan dan risiko gangguan operasi akibat kekurangan daya reaktif dapat diminimalkan.

Temuan penelitian ini juga sesuai dengan teori yang dijelaskan pada Bab II bahwa daya reaktif tidak menghasilkan kerja nyata, namun diperlukan untuk membentuk medan magnet pada generator dan peralatan induktif. Semakin kecil kebutuhan daya reaktif, maka semakin tinggi nilai faktor daya dan semakin efisien

pula pemanfaatan daya listrik pada sistem tenaga. Oleh karena itu, nilai daya reaktif sebesar 487,87 kVAR dengan faktor daya 0,90 dapat dikatakan mencerminkan kondisi operasi generator yang baik, karena sebagian besar daya semu berhasil dimanfaatkan sebagai daya aktif yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik operasional PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun.

4.8.4 Analisis Efisiensi Generator Berdasarkan Power Triangle

Konsep *Power Triangle* (segitiga daya) digunakan untuk menggambarkan hubungan antara daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S) pada sistem tenaga listrik tiga fasa. Ketiga komponen tersebut saling berkaitan dalam menentukan tingkat efisiensi pemanfaatan energi listrik yang dihasilkan oleh generator. Pada penelitian ini diperoleh daya aktif sebesar 1007,35 kW, daya semu sebesar 1119,27 kVA, dan daya reaktif sebesar 487,87 kVAR dengan nilai faktor daya (cos φ) sebesar 0,90. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar daya semu yang dihasilkan generator berhasil dikonversi menjadi daya aktif yang dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan operasional pabrik.

Secara matematis, hubungan antara ketiga besaran daya tersebut membentuk sebuah segitiga siku-siku, di mana daya aktif berada pada sisi horizontal, daya reaktif berada pada sisi vertikal, sedangkan daya semu merupakan sisi miring segitiga. Berdasarkan konsep tersebut, semakin kecil nilai daya reaktif dibandingkan daya semu, maka sudut fase (φ) antara tegangan dan arus akan semakin kecil sehingga nilai faktor daya akan semakin mendekati satu. Kondisi ini menunjukkan bahwa kemampuan generator dalam mengubah daya semu menjadi daya aktif semakin baik.

Pada penelitian ini, nilai faktor daya sebesar 0,90 menunjukkan bahwa sekitar 90% daya semu berhasil dimanfaatkan sebagai daya aktif, sedangkan sisanya digunakan sebagai daya reaktif untuk membentuk medan magnet pada generator dan beban induktif. Nilai tersebut menunjukkan bahwa generator

bekerja dengan tingkat efisiensi yang tinggi karena sebagian besar kapasitas listrik yang dibangkitkan dapat dimanfaatkan secara efektif oleh sistem. Dengan demikian, rugi-rugi daya akibat komponen reaktif masih dapat ditekan sehingga proses pembangkitan berlangsung lebih efisien.

Besarnya daya aktif sebesar 1007,35 kW dibandingkan daya semu sebesar 1119,27 kVA menunjukkan bahwa selisih antara kedua nilai tersebut relatif kecil. Selisih tersebut merupakan akibat adanya daya reaktif sebesar 487,87 kVAR yang dibutuhkan sistem untuk mempertahankan pembentukan medan magnet pada generator dan peralatan listrik induktif. Walaupun daya reaktif tidak menghasilkan kerja nyata, keberadaannya tetap diperlukan agar sistem tenaga listrik dapat beroperasi secara stabil. Oleh karena itu, tujuan utama pengoperasian generator bukan menghilangkan daya reaktif, tetapi menjaga agar nilainya tetap berada pada batas yang diperlukan sehingga faktor daya tetap tinggi.

Nilai faktor daya yang tinggi juga memberikan keuntungan terhadap arus generator. Berdasarkan persamaan daya tiga fasa, apabila daya aktif yang dihasilkan tetap tetapi faktor daya menurun, maka arus yang mengalir pada generator akan meningkat. Peningkatan arus tersebut menyebabkan rugi-rugi tembaga (*copper losses*) semakin besar karena rugi-rugi penghantar sebanding dengan kuadrat arus (I^2R). Selain itu, kenaikan arus juga menyebabkan temperatur kumparan generator meningkat sehingga efisiensi kerja generator dapat menurun dan umur isolasi kumparan menjadi lebih pendek. Sebaliknya, pada penelitian ini nilai faktor daya 0,90 menyebabkan arus generator tetap berada pada kondisi yang relatif rendah untuk menghasilkan daya aktif sebesar 1007,35 kW, sehingga rugi-rugi daya dapat diminimalkan.

Ditinjau dari kapasitas generator sebesar 1600 kW, daya aktif yang dihasilkan baru mencapai sekitar 62,96% dari kapasitas maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa generator masih memiliki cadangan kapasitas yang cukup besar sehingga masih mampu mengakomodasi peningkatan kebutuhan daya listrik apabila terjadi kenaikan beban produksi. Kondisi tersebut juga memberikan keuntungan karena generator tidak bekerja secara berlebihan (*overload*), sehingga suhu operasi, getaran, dan tegangan keluaran dapat dipertahankan dalam kondisi yang stabil.

Hubungan antara daya aktif, daya reaktif, dan daya semu juga menunjukkan bahwa sistem eksitasi generator bekerja dengan baik. Sistem eksitasi berfungsi mengatur arus medan rotor sehingga generator mampu mempertahankan tegangan keluaran dan menyuplai daya reaktif sesuai kebutuhan beban. Dengan faktor daya sebesar 0,90, sistem eksitasi mampu menjaga keseimbangan antara kebutuhan daya aktif dan daya reaktif sehingga generator tetap bekerja pada kondisi operasi yang optimal. Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan eksitasi pada generator di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun masih berada dalam kondisi yang baik.

Apabila nilai faktor daya turun jauh di bawah 0,90, maka daya reaktif akan meningkat sehingga kapasitas generator yang seharusnya dapat digunakan untuk menghasilkan daya aktif akan berkurang. Akibatnya, kemampuan generator dalam menyuplai energi listrik menjadi menurun walaupun kapasitas terpasangnya tetap sama. Selain itu, peningkatan daya reaktif juga menyebabkan penurunan efisiensi sistem tenaga listrik karena semakin banyak energi yang hanya digunakan untuk membentuk medan magnet tanpa menghasilkan kerja nyata. Oleh karena itu, pemeliharaan sistem eksitasi dan pengendalian faktor daya menjadi aspek penting dalam menjaga performa generator.

Berdasarkan keseluruhan hasil analisis tersebut, dapat disimpulkan bahwa hubungan antara daya aktif, daya reaktif, daya semu, dan faktor daya pada generator PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun telah menunjukkan kondisi operasi yang baik. Nilai faktor daya sebesar 0,90 mencerminkan bahwa generator mampu memanfaatkan sebagian besar daya semu menjadi daya aktif yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik pabrik. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa efisiensi pemanfaatan energi listrik pada generator masih tergolong tinggi sehingga sistem pembangkitan dapat beroperasi secara andal dan mampu mendukung kelangsungan proses produksi secara berkesinambungan.

4.8.4 Analisis Energi Listrik

Energi listrik merupakan jumlah energi yang dihasilkan generator selama periode operasi tertentu. Dalam penelitian ini, energi listrik dihitung berdasarkan hasil perkalian antara daya aktif generator dengan waktu operasi pembangkit

menggunakan persamaan $E = P \times t$. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh energi listrik sebesar 24.176,4 kWh dalam waktu operasi 24 jam. Nilai tersebut menunjukkan jumlah energi listrik yang mampu diproduksi generator untuk memenuhi kebutuhan operasional PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun selama satu hari penuh.

Besarnya energi listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh dua parameter utama, yaitu daya aktif generator dan lama waktu operasi pembangkit. Daya aktif sebesar 1007,35 kW menunjukkan kemampuan generator menghasilkan energi listrik yang benar-benar dimanfaatkan oleh beban, sedangkan waktu operasi selama **24 jam** menunjukkan bahwa sistem pembangkit bekerja secara kontinu tanpa mengalami penghentian operasi. Oleh karena itu, semakin besar daya aktif dan semakin lama generator beroperasi, maka energi listrik yang dihasilkan juga akan semakin besar.

Apabila ditinjau berdasarkan waktu operasi, generator menghasilkan energi listrik rata-rata sekitar 1007,35 kWh setiap jam. Dengan kata lain, setiap satu jam generator mampu memasok lebih dari 1 MWh energi listrik untuk memenuhi kebutuhan berbagai peralatan produksi di pabrik. Energi tersebut digunakan untuk mengoperasikan motor listrik, pompa, conveyor, blower, sistem klarifikasi, stasiun kernel, serta berbagai peralatan pendukung lainnya yang bekerja secara terus-menerus selama proses pengolahan tandan buah segar berlangsung.

Selain dianalisis per jam, besarnya energi listrik juga dapat ditinjau berdasarkan sistem kerja pabrik. Apabila satu hari operasi dibagi menjadi tiga shift kerja masing-masing selama delapan jam, maka energi listrik yang dihasilkan setiap shift adalah sekitar:

$$E = 1007{,}35 \times 8 = 8.058{,}8 \text{ kWh}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa dalam setiap shift produksi generator mampu menyediakan energi listrik sekitar 8.058,8 kWh. Nilai tersebut mencerminkan bahwa sistem pembangkit memiliki kemampuan yang cukup untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik selama seluruh aktivitas produksi berlangsung. Dengan demikian, proses produksi tidak terganggu akibat kekurangan energi listrik selama pergantian shift.

Apabila dibandingkan dengan kapasitas generator sebesar 1600 kW, energi listrik yang dihasilkan menunjukkan bahwa generator tidak selalu bekerja pada kapasitas maksimumnya. Kondisi tersebut berkaitan dengan hasil perhitungan load factor sebesar 62,96%, yang menunjukkan bahwa selama operasi generator hanya memanfaatkan sekitar dua pertiga dari kapasitas terpasangnya. Walaupun demikian, jumlah energi listrik yang dihasilkan tetap mampu memenuhi kebutuhan operasional pabrik sehingga tidak diperlukan pengoperasian generator pada kapasitas penuh.

Besarnya energi listrik yang dihasilkan juga mencerminkan keberhasilan proses konversi energi pada sistem PLTU. Energi panas yang berasal dari pembakaran biomassa berupa fiber dan cangkang diubah menjadi energi uap oleh boiler. Selanjutnya energi uap dikonversi menjadi energi mekanik oleh turbin uap, kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Dengan demikian, nilai energi listrik sebesar 24.176,4 kWh merupakan hasil akhir dari rangkaian proses konversi energi yang berlangsung pada sistem pembangkit.

Keberhasilan menghasilkan energi listrik dalam jumlah tersebut tidak terlepas dari kondisi operasi boiler dan turbin. Boiler yang mampu menghasilkan uap sebesar 30 ton/jam pada tekanan 20 bar dan temperatur 265°C menyediakan energi yang cukup untuk memutar turbin secara stabil. Putaran turbin sebesar 1500 rpm kemudian menggerakkan generator sehingga menghasilkan daya aktif yang relatif konstan. Apabila salah satu komponen mengalami penurunan kinerja, seperti berkurangnya tekanan uap atau penurunan putaran turbin, maka daya aktif generator juga akan menurun sehingga energi listrik yang dihasilkan menjadi lebih kecil.

Nilai energi listrik juga dipengaruhi oleh faktor daya generator. Pada penelitian ini faktor daya sebesar 0,90 menunjukkan bahwa sebagian besar daya semu berhasil dikonversi menjadi daya aktif. Karena energi listrik dihitung berdasarkan daya aktif, maka semakin tinggi faktor daya akan semakin besar energi listrik yang dapat dihasilkan dalam waktu operasi yang sama. Sebaliknya, apabila faktor daya menurun maka daya aktif yang dihasilkan juga berkurang sehingga energi listrik yang diperoleh menjadi lebih kecil walaupun generator beroperasi selama waktu yang sama.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa generator mampu menghasilkan energi listrik secara kontinu selama 24 jam tanpa mengalami gangguan operasi yang berarti. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem pembangkitan memiliki tingkat keandalan yang baik dalam memenuhi kebutuhan energi listrik internal pabrik. Keandalan tersebut sangat penting karena seluruh proses pengolahan kelapa sawit bergantung pada kontinuitas pasokan energi listrik. Gangguan terhadap pembangkitan listrik dapat menyebabkan terhentinya proses produksi sehingga menurunkan produktivitas pabrik.

Berdasarkan keseluruhan hasil analisis dapat disimpulkan bahwa energi listrik sebesar 24.176,4 kWh per hari menunjukkan kemampuan generator dalam menghasilkan pasokan energi listrik yang stabil dan berkesinambungan. Nilai tersebut mencerminkan bahwa sistem PLTU di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daunmasih mampu mendukung kebutuhan energi listrik operasional pabrik secara optimal. Selain itu, hasil ini juga memperlihatkan bahwa proses konversi energi dari biomassa menjadi energi listrik berlangsung dengan baik sehingga pembangkit dapat dioperasikan secara efisien dan andal sebagai sumber listrik utama pabrik.

4.8.5 Analisis Faktor Beban (*Load Factor)*

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai load factor (faktor beban) sebesar 62,96%**.** Nilai tersebut menunjukkan bahwa selama periode operasi generator hanya memanfaatkan sekitar 62,96% dari kapasitas maksimum yang dimilikinya, yaitu sebesar 1600 kW. Dengan kata lain, rata-rata daya yang digunakan generator selama beroperasi masih berada di bawah kapasitas terpasang sehingga generator masih memiliki cadangan daya untuk melayani peningkatan kebutuhan listrik apabila sewaktu-waktu terjadi kenaikan beban pada proses produksi.

Load factor merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat pemanfaatan kapasitas pembangkit listrik. Nilai ini menunjukkan seberapa besar kemampuan generator dimanfaatkan dibandingkan dengan kapasitas maksimum yang tersedia. Semakin tinggi nilai load factor, maka semakin besar pula tingkat pemanfaatan kapasitas generator. Sebaliknya, nilai load factor yang rendah menunjukkan bahwa generator bekerja jauh di bawah

kapasitas nominalnya sehingga masih terdapat kapasitas yang belum dimanfaatkan secara optimal.

Pada penelitian ini diperoleh load factor sebesar 62,96%**,** yang berarti bahwa generator tidak bekerja pada kondisi beban penuh (*full load*). Kondisi tersebut masih tergolong baik karena pembebanan generator berada pada tingkat yang aman. Pengoperasian generator di bawah kapasitas maksimum dapat mengurangi tekanan kerja pada komponen-komponen utama generator, seperti kumparan stator, rotor, sistem pendingin, serta bantalan (*bearing*). Dengan demikian, risiko terjadinya kenaikan temperatur berlebih (*overheating*) maupun gangguan mekanis dapat diminimalkan.

Selain memberikan keuntungan terhadap keandalan sistem, nilai load factor sebesar 62,96% juga menunjukkan bahwa pembangkit masih memiliki kapasitas cadangan sekitar 37,04%. Cadangan kapasitas tersebut sangat penting untuk mengantisipasi terjadinya peningkatan konsumsi listrik akibat bertambahnya jumlah peralatan produksi atau meningkatnya kapasitas pengolahan tandan buah segar. Dengan adanya cadangan daya tersebut, generator masih mampu memenuhi kenaikan kebutuhan energi listrik tanpa harus dilakukan penggantian unit pembangkit.

Apabila dihitung berdasarkan kapasitas generator sebesar 1600 kW, maka daya aktif yang digunakan rata-rata sebesar 1007,35 kW masih berada jauh di bawah batas maksimum generator. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa generator bekerja pada daerah operasi yang relatif stabil. Pada kondisi seperti ini, tegangan keluaran, frekuensi, dan putaran generator umumnya lebih mudah dipertahankan sesuai standar operasi sehingga kualitas energi listrik yang disuplai kepada beban tetap terjaga.

Namun demikian, load factor yang terlalu rendah juga menunjukkan bahwa kapasitas generator belum dimanfaatkan secara optimal. Generator yang terus-menerus bekerja jauh di bawah kapasitas nominal dapat menyebabkan investasi pembangkit menjadi kurang efisien karena sebagian kapasitas generator tidak dimanfaatkan dalam menghasilkan energi listrik. Oleh karena itu, dalam pengoperasian sistem tenaga listrik diperlukan keseimbangan antara keandalan

operasi dan tingkat pemanfaatan kapasitas generator agar pembangkit dapat bekerja secara ekonomis.

Pada sistem PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun, nilai load factor sebesar 62,96% masih sesuai dengan karakteristik pembangkit listrik industri (*captive power plant*). Berbeda dengan pembangkit listrik yang memasok jaringan umum, pembangkit listrik industri dirancang untuk mengikuti kebutuhan listrik proses produksi. Oleh karena itu, besarnya beban generator akan berubah sesuai jumlah peralatan yang sedang beroperasi pada setiap waktu. Kondisi tersebut menyebabkan generator tidak selalu bekerja pada kapasitas maksimum.

Besarnya load factor juga dipengaruhi oleh daya aktif dan energi listrik yang dihasilkan generator. Pada penelitian ini diperoleh daya aktif sebesar 1007,35 kW dan energi listrik sebesar 24.176,4 kWh selama waktu operasi 24 jam. Kedua parameter tersebut menunjukkan bahwa generator mampu menghasilkan energi listrik secara kontinu untuk memenuhi kebutuhan operasional pabrik. Dengan demikian, nilai load factor sebesar 62,96% bukan menunjukkan rendahnya kemampuan generator, tetapi menunjukkan bahwa kapasitas generator masih mencukupi untuk melayani kebutuhan listrik tanpa mengalami pembebanan yang berlebihan.

Dari sisi umur peralatan, pengoperasian generator pada load factor sekitar 63% memberikan keuntungan karena beban mekanis maupun beban termal pada generator tidak terlalu tinggi. Temperatur kerja generator cenderung lebih stabil sehingga proses penuaan isolasi kumparan berlangsung lebih lambat. Selain itu, getaran mekanis akibat pembebanan yang tinggi juga dapat dikurangi sehingga umur bantalan (*bearing*) dan komponen mekanis lainnya menjadi lebih panjang. Kondisi tersebut dapat menurunkan biaya pemeliharaan dan meningkatkan keandalan sistem pembangkit dalam jangka panjang.

Nilai load factor juga berkaitan erat dengan efisiensi operasi pembangkit. Generator yang bekerja mendekati kapasitas rancangannya umumnya memiliki efisiensi yang tinggi, namun apabila dibebani secara berlebihan maka rugi-rugi daya dan temperatur operasi akan meningkat. Sebaliknya, generator yang bekerja terlalu rendah dalam waktu yang lama menyebabkan pemanfaatan kapasitas

menjadi kurang optimal. Oleh karena itu, pengoperasian generator pada nilai load factor sekitar 62,96% dapat dikatakan masih berada pada kondisi yang seimbang antara aspek keandalan, keamanan operasi, dan kesiapan menghadapi peningkatan beban.

Selain itu, nilai load factor yang diperoleh juga dipengaruhi oleh kestabilan sistem pembangkitan secara keseluruhan. Boiler yang mampu menghasilkan uap sebesar 30 ton/jam, turbin yang beroperasi secara stabil, serta generator dengan faktor daya 0,90 memberikan kontribusi terhadap kemampuan pembangkit dalam mempertahankan daya aktif secara kontinu. Apabila salah satu komponen mengalami penurunan kinerja, seperti berkurangnya tekanan uap atau meningkatnya kebutuhan daya reaktif, maka daya aktif generator akan menurun sehingga nilai load factor juga akan ikut berkurang.

Berdasarkan keseluruhan hasil analisis dapat disimpulkan bahwa nilai load factor sebesar 62,96% menunjukkan bahwa generator PLTU PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun bekerja pada kondisi operasi yang aman, stabil, dan masih memiliki kapasitas cadangan yang cukup besar. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem pembangkit mampu memenuhi kebutuhan energi listrik operasional pabrik secara berkesinambungan sekaligus memberikan fleksibilitas apabila terjadi peningkatan kebutuhan beban pada masa mendatang. Dengan demikian, dari aspek pemanfaatan kapasitas generator, kinerja PLTU dapat dikategorikan **baik** karena mampu menghasilkan energi listrik secara kontinu tanpa mengalami pembebanan yang berlebihan.

4.8.6 Analisis Kinerja Generator

Generator merupakan komponen utama pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berfungsi mengubah energi mekanik dari putaran turbin menjadi energi listrik. Kinerja generator sangat menentukan kontinuitas pasokan energi listrik bagi seluruh proses produksi di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun. Oleh karena itu, evaluasi terhadap kinerja generator dilakukan berdasarkan parameter operasional yang meliputi tegangan, arus, frekuensi, putaran (rpm), faktor daya (*power factor*), daya aktif, daya semu, daya reaktif, energi listrik, dan faktor beban (*load factor*).

Berdasarkan data operasional perusahaan, generator yang digunakan merupakan generator sinkron tiga fasa dengan kapasitas terpasang sebesar 1600 kW, tegangan nominal 380 Volt, arus nominal 1700 Ampere, frekuensi 50 Hz, putaran 1500 rpm, serta faktor daya 0,90. Berdasarkan parameter tersebut diperoleh daya aktif sebesar 1007,35 kW, daya semu sebesar 1119,27 kVA, daya reaktif sebesar 487,87 kVAR, energi listrik sebesar 24.176,4 kWh per hari, dan nilai *load factor* sebesar 62,96%.

Tegangan keluaran generator sebesar 380 Volt menunjukkan bahwa generator bekerja sesuai standar sistem distribusi tegangan rendah yang digunakan pada industri pengolahan kelapa sawit. Tegangan yang stabil sangat penting karena sebagian besar peralatan produksi, seperti motor listrik, pompa, conveyor, blower, serta panel kontrol dirancang untuk beroperasi pada tegangan nominal tersebut. Apabila terjadi penurunan atau kenaikan tegangan yang signifikan, maka efisiensi kerja motor listrik dapat menurun, bahkan dapat menyebabkan gangguan operasi maupun kerusakan peralatan. Oleh karena itu, kestabilan tegangan merupakan salah satu indikator penting dalam menilai performa generator.

Arus nominal generator sebesar 1700 Ampere menunjukkan besarnya arus maksimum yang dapat dialirkan generator pada kondisi operasi normal. Nilai arus tersebut berkaitan langsung dengan besarnya daya listrik yang dapat dihasilkan. Berdasarkan hasil perhitungan, arus tersebut mampu menghasilkan daya aktif sebesar 1007,35 kW dengan faktor daya 0,90. Nilai tersebut menunjukkan bahwa generator masih bekerja di bawah kapasitas nominalnya sehingga arus yang mengalir belum mencapai kondisi pembebanan maksimum. Kondisi ini memberikan keuntungan karena rugi-rugi penghantar (*copper losses*) dan kenaikan temperatur kumparan generator masih dapat ditekan sehingga efisiensi operasi tetap terjaga.

Frekuensi generator sebesar 50 Hz menunjukkan bahwa putaran generator berada pada kondisi sinkron dengan sistem tenaga listrik yang digunakan di Indonesia. Frekuensi merupakan parameter yang sangat penting karena berhubungan langsung dengan kestabilan putaran generator dan kualitas energi listrik yang dihasilkan. Apabila frekuensi mengalami perubahan secara signifikan akibat perubahan beban atau gangguan sistem, maka kinerja motor listrik dan

peralatan elektronik di pabrik juga akan terganggu. Berdasarkan data operasional, frekuensi generator tetap berada pada nilai nominal sehingga menunjukkan bahwa keseimbangan antara daya mekanik dari turbin dan daya listrik yang dibangkitkan masih dapat dipertahankan dengan baik.

Kecepatan putaran generator sebesar 1500 rpm menunjukkan bahwa generator bekerja pada putaran sinkron untuk sistem 50 Hz. Putaran tersebut dihasilkan oleh turbin uap yang memperoleh energi dari uap hasil pembakaran biomassa di boiler. Putaran yang stabil sangat penting untuk mempertahankan frekuensi keluaran generator tetap konstan. Apabila putaran turbin menurun akibat berkurangnya tekanan uap atau terganggunya proses pembakaran pada boiler, maka frekuensi generator juga akan mengalami penurunan sehingga kualitas energi listrik menjadi tidak stabil. Oleh karena itu, kestabilan putaran turbin merupakan faktor utama dalam menjaga performa generator.

Nilai faktor daya (cos φ) sebesar 0,90 menunjukkan bahwa generator bekerja pada kondisi yang mendekati ideal. Nilai tersebut berarti sekitar 90% daya semu berhasil dikonversi menjadi daya aktif yang dapat dimanfaatkan oleh beban, sedangkan sisanya merupakan daya reaktif yang diperlukan untuk membentuk medan magnet pada generator dan peralatan induktif lainnya. Faktor daya yang tinggi menyebabkan arus generator menjadi lebih kecil dibandingkan apabila faktor daya rendah sehingga rugi-rugi daya dan pemanasan kumparan dapat diminimalkan. Dengan demikian, efisiensi operasi generator dapat dipertahankan pada kondisi yang baik.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa generator menghasilkan daya aktif sebesar 1007,35 kW, atau sekitar 62,96% dari kapasitas maksimum generator sebesar 1600 kW. Nilai tersebut menunjukkan bahwa generator tidak bekerja pada kondisi beban penuh sehingga masih tersedia cadangan kapasitas yang cukup besar. Cadangan kapasitas tersebut memberikan keuntungan karena generator masih mampu mengakomodasi peningkatan kebutuhan listrik apabila kapasitas produksi pabrik meningkat di masa mendatang. Selain itu, pembebanan yang tidak berlebihan juga dapat memperpanjang umur operasi generator karena beban mekanis maupun termal pada komponen generator menjadi lebih rendah.

Daya semu sebesar 1119,27 kVA menunjukkan kapasitas total daya yang disuplai generator ke sistem tenaga listrik. Sementara itu, daya reaktif sebesar 487,87 kVAR menunjukkan besarnya daya yang digunakan untuk membentuk medan magnet pada generator dan beban induktif. Kombinasi antara daya aktif, daya semu, dan daya reaktif tersebut membentuk hubungan *Power Triangle* yang telah dijelaskan pada Bab II. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proporsi daya aktif lebih dominan dibandingkan daya reaktif sehingga menunjukkan tingkat efisiensi pemanfaatan energi listrik yang cukup baik.

Energi listrik yang dihasilkan sebesar 24.176,4 kWh per hari menunjukkan bahwa generator mampu memasok kebutuhan listrik secara kontinu selama proses produksi berlangsung. Besarnya energi tersebut merupakan hasil perkalian daya aktif dengan waktu operasi selama 24 jam. Hal ini menunjukkan bahwa generator memiliki tingkat keandalan yang baik dalam memenuhi kebutuhan energi listrik berbagai stasiun proses di pabrik, mulai dari stasiun perebusan, pengepresan, klarifikasi, kernel, hingga utilitas lainnya.

Nilai *load factor* sebesar 62,96% menunjukkan bahwa generator masih beroperasi pada tingkat pembebanan yang aman. Kondisi tersebut mencerminkan bahwa generator belum mengalami pembebanan berlebih (*overloading*) sehingga temperatur kerja, tegangan, serta kestabilan operasi dapat dipertahankan. Selain itu, masih tersedianya kapasitas cadangan memberikan fleksibilitas bagi perusahaan apabila terjadi peningkatan kebutuhan listrik pada masa mendatang.

Secara keseluruhan, seluruh parameter operasional generator menunjukkan bahwa sistem pembangkitan listrik di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun bekerja dalam kondisi yang baik. Tegangan, arus, frekuensi, putaran, faktor daya, daya aktif, daya semu, daya reaktif, energi listrik, serta *load factor* saling mendukung dalam menghasilkan sistem pembangkitan yang stabil dan andal. Hal tersebut menunjukkan bahwa generator masih mampu memenuhi kebutuhan energi listrik operasional pabrik secara optimal dengan tingkat efisiensi yang baik serta memiliki cadangan kapasitas yang cukup untuk mendukung peningkatan beban pada masa yang akan datang.

4.8.7 Analisis Kinerja Generator

Generator merupakan komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berfungsi mengubah energi mekanik hasil putaran turbin menjadi energi listrik. Kinerja generator sangat menentukan kontinuitas pasokan energi listrik karena seluruh kebutuhan listrik pada proses produksi bergantung pada kemampuan generator menghasilkan daya listrik secara stabil. Oleh karena itu, evaluasi terhadap parameter operasi generator seperti tegangan, arus, frekuensi, faktor daya, dan putaran generator menjadi bagian penting dalam analisis kinerja pembangkit.

Berdasarkan data operasional PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun, generator yang digunakan merupakan generator sinkron tiga fasa dengan kapasitas terpasang sebesar 1600 kW, tegangan nominal 380 Volt, arus nominal 1700 Ampere, frekuensi 50 Hz, faktor daya 0,90, serta kecepatan putaran 1500 rpm. Parameter-parameter tersebut menunjukkan bahwa generator dioperasikan sesuai karakteristik sistem tenaga listrik tiga fasa yang umum digunakan pada industri kelapa sawit.

Tegangan keluaran generator sebesar 380 Volt menunjukkan bahwa sistem distribusi listrik internal pabrik menggunakan tegangan rendah tiga fasa yang sesuai untuk mengoperasikan berbagai peralatan produksi seperti motor listrik, pompa, conveyor, sterilizer, press station, serta peralatan pendukung lainnya. Tegangan yang stabil sangat penting karena fluktuasi tegangan dapat menyebabkan penurunan performa motor listrik, meningkatnya arus kerja, bahkan kerusakan pada peralatan listrik. Oleh karena itu, kestabilan tegangan generator menjadi salah satu indikator bahwa sistem pembangkitan masih bekerja dengan baik.

Selain tegangan, arus generator sebesar 1700 Ampere menunjukkan besarnya arus yang mengalir pada saat generator menyuplai daya ke seluruh beban listrik di pabrik. Besarnya arus dipengaruhi oleh jumlah beban yang sedang beroperasi dan besarnya daya aktif yang harus disuplai generator. Semakin besar beban listrik yang digunakan, maka arus generator juga akan meningkat. Namun demikian, berdasarkan hasil perhitungan daya aktif sebesar 1007,35 kW, generator masih bekerja di bawah kapasitas maksimumnya sehingga arus yang

mengalir masih berada pada kondisi operasi yang aman. Kondisi tersebut mengurangi kemungkinan terjadinya pemanasan berlebih pada kumparan stator maupun rotor generator.

Frekuensi generator sebesar 50 Hz menunjukkan bahwa kecepatan putaran generator mampu dipertahankan sesuai standar sistem tenaga listrik di Indonesia. Pada generator sinkron, frekuensi sangat dipengaruhi oleh kecepatan putaran turbin. Apabila putaran turbin mengalami penurunan akibat berkurangnya tekanan atau debit uap dari boiler, maka frekuensi listrik yang dihasilkan juga akan menurun. Sebaliknya, apabila putaran turbin meningkat melebihi nilai nominal, frekuensi juga akan meningkat sehingga dapat mengganggu kerja peralatan listrik. Oleh karena itu, frekuensi sebesar 50 Hz menunjukkan bahwa koordinasi antara boiler, turbin, dan generator berlangsung dengan baik sehingga sistem pembangkitan mampu menghasilkan energi listrik yang stabil.

Kecepatan putaran generator sebesar 1500 rpm juga menunjukkan bahwa generator bekerja sesuai karakteristik generator sinkron empat kutub pada frekuensi 50 Hz. Putaran tersebut dihasilkan oleh turbin uap yang memperoleh suplai uap dari boiler dengan tekanan sekitar 20 bar dan temperatur 265°C. Putaran yang stabil menjadi syarat utama agar generator dapat menghasilkan tegangan dan frekuensi yang konstan. Dengan demikian, kestabilan putaran generator mencerminkan bahwa energi mekanik yang dihasilkan turbin masih mampu memenuhi kebutuhan pembangkitan energi listrik secara kontinu.

Faktor daya (cos φ) sebesar 0,90 menunjukkan bahwa generator bekerja dengan tingkat efisiensi yang baik. Nilai faktor daya yang mendekati satu menunjukkan bahwa sebagian besar daya semu berhasil dikonversi menjadi daya aktif yang dapat dimanfaatkan oleh beban. Kondisi tersebut menyebabkan arus generator menjadi lebih kecil dibandingkan apabila generator bekerja dengan faktor daya rendah. Akibatnya, rugi-rugi daya akibat pemanasan kumparan (copper losses) dapat ditekan sehingga efisiensi generator meningkat dan umur isolasi kumparan menjadi lebih panjang.

Hubungan antara faktor daya dengan daya aktif, daya semu, dan daya reaktif juga menunjukkan bahwa generator tidak hanya menghasilkan daya untuk melakukan kerja nyata, tetapi juga menyuplai daya reaktif yang diperlukan oleh

beban induktif seperti motor listrik dan transformator. Dengan faktor daya sebesar 0,90, generator masih mampu mempertahankan keseimbangan antara kebutuhan daya aktif dan daya reaktif sehingga sistem tenaga listrik tetap bekerja secara stabil. Kondisi ini sesuai dengan konsep Power Triangle yang telah dijelaskan pada Bab II, yaitu semakin tinggi nilai faktor daya maka semakin besar proporsi daya aktif dibandingkan daya semu.

Kinerja generator juga dipengaruhi oleh kestabilan sistem eksitasi. Sistem eksitasi berfungsi menghasilkan medan magnet pada rotor generator sehingga proses induksi elektromagnetik dapat berlangsung dengan baik. Apabila eksitasi terlalu rendah, tegangan generator akan menurun dan kemampuan generator menyuplai daya reaktif menjadi berkurang. Sebaliknya, apabila eksitasi terlalu tinggi maka generator akan menghasilkan daya reaktif yang berlebihan sehingga efisiensi sistem dapat menurun. Berdasarkan hasil penelitian, nilai faktor daya sebesar 0,90 menunjukkan bahwa pengaturan eksitasi generator masih berada pada kondisi yang baik sehingga generator mampu menghasilkan daya aktif secara optimal.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa generator PLTU di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun masih bekerja dalam kondisi operasi yang baik. Hal ini ditunjukkan oleh tegangan yang stabil sebesar 380 Volt, frekuensi sesuai standar sebesar 50 Hz, kecepatan putaran 1500 rpm, faktor daya sebesar 0,90, serta daya aktif sebesar 1007,35 kW yang masih berada di bawah kapasitas maksimum generator sebesar 1600 kW. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa generator masih memiliki cadangan kapasitas untuk mengantisipasi peningkatan kebutuhan beban listrik pada proses produksi tanpa mengalami pembebanan berlebih (overloading).

Dengan demikian, berdasarkan seluruh parameter operasi yang dianalisis, dapat disimpulkan bahwa generator memiliki tingkat keandalan yang baik dalam memenuhi kebutuhan energi listrik pabrik. Kinerja generator yang stabil menunjukkan bahwa proses konversi energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik berlangsung secara efisien, sehingga kontinuitas pasokan listrik untuk mendukung seluruh aktivitas produksi di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun dapat dipertahankan dengan baik.

4.8.8 Keterkaitan dengan Kondisi Boiler dan Turbin Terhadap Kinerja Generator

Kinerja generator tidak terlepas dari kondisi boiler dan turbin uap. Boiler menghasilkan uap bertekanan 20 bar dengan temperatur 265°C yang digunakan sebagai penggerak turbin. Turbin kemudian mengubah energi panas uap menjadi energi mekanik untuk memutar generator. Apabila tekanan uap, temperatur uap, atau pasokan bahan bakar biomassa mengalami penurunan, maka putaran turbin akan menurun sehingga daya listrik yang dihasilkan generator juga berpotensi menurun. Dengan demikian, stabilitas operasi boiler dan turbin menjadi faktor penting dalam menjaga kinerja generator.

Apabila tekanan uap mengalami penurunan akibat berkurangnya pasokan bahan bakar atau menurunnya efisiensi boiler, maka energi mekanik yang diterima turbin juga akan berkurang. Kondisi tersebut menyebabkan putaran generator menurun sehingga daya listrik yang dihasilkan juga akan menurun. Oleh karena itu, walaupun penelitian ini tidak mengevaluasi efisiensi boiler dan turbin secara kuantitatif, kondisi operasi kedua komponen tersebut tetap menjadi faktor pendukung dalam menjaga kestabilan keluaran generator.

4.8.9 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa parameter keluaran generator berupa daya listrik, energi listrik, dan faktor beban dapat digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi kinerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Hasil penelitian ini memiliki keterkaitan dengan penelitian Ramadhoni et al., (2024) yang menganalisis penggunaan generator turbin pada PTPN IV Unit PKS Berangir. Penelitian tersebut memperoleh pemakaian maksimum turbin sebesar 574,19 kW atau 71,77% dari kapasitas turbin. Sementara itu, penelitian ini memperoleh daya aktif generator sebesar 1.007,35 kW dengan kapasitas generator sebesar 1.600 kW dan load factor sebesar 62,96%. Perbedaan hasil tersebut dipengaruhi oleh perbedaan kapasitas pembangkit, kondisi operasional, serta karakteristik beban pada masing-masing pabrik. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian Yawan Fauzy Dharmawan, (2024) yang menggunakan daya keluaran generator sebagai dasar dalam mengevaluasi performa generator pada sistem

pembangkit listrik tenaga uap. Namun, penelitian tersebut lebih menitikberatkan pada hubungan antara tekanan uap, temperatur, dan efisiensi generator.

Selain itu, hasil penelitian ini juga sejalan dengan penelitian Syahputra et al., (2024) yang menyatakan bahwa kestabilan operasi generator sinkron sangat berpengaruh terhadap kontinuitas pasokan energi listrik pada sistem pembangkitan. Pada penelitian ini, kestabilan tersebut ditunjukkan melalui hasil perhitungan daya aktif sebesar 1007,35 kW, energi listrik sebesar 24.176,4 kWh per hari, dan nilai load factor sebesar 62,96%, yang menunjukkan bahwa generator masih bekerja dalam kondisi operasi yang baik.

Berbeda dengan penelitian Wahyu et al., (2023) yang menganalisis performa PLTU berdasarkan respons terhadap perubahan beban, penelitian ini mengevaluasi kinerja pembangkit melalui parameter keluaran generator sesuai dengan data operasional yang tersedia di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun. Dengan demikian, penelitian ini memberikan gambaran mengenai kemampuan generator dalam memenuhi kebutuhan energi listrik operasional pabrik berdasarkan daya listrik, energi listrik, dan faktor beban.

4.8.10 Implikasi terhadap Operasional Pabrik

Hasil analisis menunjukkan bahwa generator mampu menghasilkan daya aktif sebesar 1007,35 kW dengan energi listrik sebesar 24.176,4 kWh/hari dan load factor sebesar 62,96%**.** Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem pembangkit masih memiliki kapasitas cadangan untuk mengantisipasi peningkatan kebutuhan listrik pada proses produksi. Oleh karena itu, pemeliharaan boiler, turbin, dan generator secara berkala perlu terus dilakukan agar kualitas uap, putaran turbin, dan keluaran generator tetap stabil sehingga keandalan pasokan listrik bagi operasional pabrik dapat dipertahankan.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai analisis kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Sistem kerja PLTU di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun berlangsung melalui proses pembakaran biomassa berupa fiber dan cangkang pada boiler berkapasitas 35 ton/jam yang menghasilkan steam flow aktual sekitar 30 ton/jam pada tekanan 20 bar dan temperatur 265°C. Uap tersebut dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin uap yang terhubung dengan generator sinkron sehingga menghasilkan energi listrik bagi operasional pabrik. Berdasarkan hasil analisis, ketersediaan biomassa sebesar 8.250 kg/jam mampu memenuhi kebutuhan bahan bakar teoritis sebesar 5.500 kg/jam, sehingga sistem pembangkit dapat beroperasi secara mandiri dengan masih tersedia cadangan bahan bakar sekitar 2.850 kg/jam.
2. Berdasarkan hasil perhitungan, generator menghasilkan daya aktif sebesar 1007,35 kW, daya semu sebesar 1119,27 kVA, dan daya reaktif sebesar

487,87 kVAR dengan faktor daya sebesar 0,90. Nilai tersebut menunjukkan bahwa generator mampu mengonversi sebagian besar daya semu menjadi daya aktif yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik.

3. Energi listrik yang dihasilkan generator selama 24 jam operasi sebesar 24.176,4 kWh/hari. Berdasarkan kapasitas generator sebesar 1600 kW, diperoleh nilai load factor sebesar 62,96%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa generator beroperasi pada sekitar 63% dari kapasitas maksimumnya, sehingga masih tersedia cadangan kapasitas untuk mengantisipasi peningkatan beban listrik tanpa harus membebani generator secara penuh.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Perusahaan diharapkan melakukan pemantauan dan pencatatan parameter operasional generator secara berkala, seperti tegangan, arus, faktor daya, frekuensi, dan daya keluaran, sehingga evaluasi kinerja pembangkit dapat dilakukan secara lebih akurat.
2. Pemeliharaan boiler, turbin uap, dan generator perlu dilakukan secara rutin untuk menjaga kestabilan tekanan uap, putaran turbin, serta keluaran daya generator agar kontinuitas pasokan listrik tetap terjaga.
3. Penelitian selanjutnya disarankan tidak hanya menganalisis daya listrik, energi listrik, dan faktor beban, tetapi juga menambahkan analisis efisiensi boiler, efisiensi turbin, heat rate, specific fuel consumption, atau efisiensi keseluruhan PLTU sehingga evaluasi kinerja pembangkit menjadi lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

Adegoke, S. A., & Sun, Y. (2023). *Power system optimization approach to mitigate voltage instability issues : A review Power system optimization approach to mitigate voltage instability issues : A review*. *1916*. https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2153416

Andriyuda, F., & Rusirawan, D. (2024). *Evaluasi Kondensor Berpendingin Udara dan Air pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap*. *18*(2), 89–103.

Awliya, G., Ashfania, M., Haryanto, I., Awliya, H., & Salman, M. (2021). *Optimisasi Dimensi Kanal Outfall Air Pendingin PLTU Dengan Memperhatikan Dampak Lingkungan Pada Air Laut*. *23*(3), 16–25.

Azubuike, U. G., Egbuhuzor, L. C., Njoku, H. O., & Ekechukwu, O. V. (2023). *Exergy analysis of a steam power plant at full and partial load conditions*. *40*(2), 182–197.

Bulatov, Y., Kryukov, A., & Suslov, K. (2023). *applied sciences Effect of Unbalanced and Non-Linear Loads on Operation of the Turbogenerator of a Distributed Generation Unit*.

Djafar, R., Liputo, B., & Djamalu, Y. (2021). *Menentukan Kerugian Energi pada Komponen Utama PLTU Menggunakan Simulasi Cylcle Tempo*. *7*, 36–40.

Febrianto, M. A., & Fathurahman, M. (2025). *Analisis Komparatif Open Feedwater Heater dan Closed Feedwater Heater dalam Upaya Optimasi Siklus Rankine Analisis energi siklus Rankine dapat dilihat pada Gambar 2 Sehingga upaya adalah dengan memanfaatkan panas kebutuhan energi di boiler , sehingga pada feedwater heater diatas adalah pada Heater pada Sistem Pembangkit Listrik Beberapa penelitian telah dilakukan un-tuk meningkatkan efisiensi termal*. *10*(1), 15–21.

Fortuna, L., & Buscarino, A. (2022). *Nonlinear Technologies in Advanced Power Systems : Analysis and Control*. 2–5.

Gimelli, A., & Luongo, A. (2012). *2 . 3 MW Biomass Steam Power Plant : Experimental and Thermodynamic Analysis Key words*. *1*(10), 1741–1746.

Gustika, R. P., & Mardiyanto, I. R. (2024). *Analisis Efektivitas High Pressure Heater (HPH) 7 PT . Z*. *11*(1), 400–405.

Husain, R. A., Faiz, M. R., Wahyu, M., Kusumawardana, A., Gumilar, L., & Habibi, M. A. (2024). *Analysis of System Operation Optimization In Steam Power Plants With the Lagrange Method*. *11*(1), 29–37. https://doi.org/10.33019/jurnalecotipe.v11i1.4479

Juliana, A., H, Y. S., & Irnanda, P. (2023). *Pengaruh Arus Eksitasi Terhadap Pembebanan Pada Generator Sinkron Unit 7 di ULPLTA TES LEBONG PT PLN (PERSERO)*. *13*, 40–47.

Kumendong, C., & Mende, J. (2023). *ANALISIS PARAMETER KINERJA UNIT PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP SULUT-3*. 60–72.

Lakshmanan, M., Fayek, H. H., Prabaakaran, K., & Barua, S. (2023). *Reactive power control in renewable rich power grids : A literature review*. *December 2022*, 1303–1327. https://doi.org/10.1049/rpg2.12674

Liu, H., Zhao, H., Yang, J., & Peng, D. (2024). *Research on Optimal Operation of Power Generation and Consumption for Enterprises with Captive Power Plants Participating in Power Grid Supply – Demand Regulation*.

Mado, I., Budiman, A., & Rantepadang, A. (2023). *RELIABILITY ANALYSIS OF 3 PHASE GENERATOR SET AS AN EMERGENCY POWER SUPPLY IF*

THERE ARE ELECTRICITY OUTAGES AT PT . INTRACAWOOD MANUFACTURING. *2*(2), 99–108. https://doi.org/10.57102/jescee.v2i2.66

Management, C. (2022). *An OCPP-Based Approach for Electric Vehicle Charging Management*. 1–14.

Mubarak, H., & Arham, M. (2024). *Efisiensi Boiler Dan Turbin Uap Untuk PLTU Unit 2 PT . XYZ*. *7*(1), 49–62.

Mulkan, A. (2025). *Analisis Sistem PLTU Berbahan Bakar Biomassa di PT . Beurata Subur Persada Kabupaten Nagan Raya*. *02*(01), 27–31.

Ramadhoni, W., Pasaribu, F. I., Kusuma, B. S., Nasution, E. S., Evalina, N., Amiruddin, A., Studi, P., Elektro, T., Teknik, F., Muhammadiyah, U., Utara, S., Studi, P., Industri, T., Teknik, F., Area, U. M., Studi, P., Mesin, T., Muhammadiyah, U., Utara, S., … Bakar, B. (2024). *ANALISA KAPASITAS PENGGUNAAN GENERATOR TURBIN 800 KW TERHADAP*. *13*(2), 41–47.

Roni, K. A., Widaputra, Y., & Dewi, D. K. (2021). *ANALISIS PENGARUH RASIO SERABUT DAN CANGKANG KELAPA SAWIT SEBAGAI BAHAN BAKAR PADA BOILER*. *6*, 1–6.

Rusady, R., & Mado, I. (2023). *RELIABILITY ANALYSIS OF PLTMG SYSTEM OPERATION PT PERTAMINA EP . BUNYU BASED ON LOAD LOSS PROBABILITY INDEX*. *2*(2), 109–124. https://doi.org/10.57102/jescee.v2i2.67

Sapta, L. T., & Umiyati, E. (2024). *Determinants of electricity demand in the industrial and commercial sector in Indonesia*. *19*(1), 60–67.

Saputra, B. A. (2023). *Performance analysis of a single-cylinder type steam turbine with a capacity of 3 . 5 mw using enthalpy drop method*. *27*(3), 319–326.

Saputri, Y. A., Sa, K., & Yulianto, E. (2022). *ANALISIS EFISIENSI HEATER PADA PENGOLAHAN STEAM UNIT 7 PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP*. *8*(9), 54–63.

Sihombing, G., Lubis, K., Amir, U., & Reat, H. (2024). *Analisis Performansi Turbin Uap dengan Kapasitas 115 MW dan Putaran 3000 Rpm pada unit 1 PLTU Labuhan Angin Sibolga*. *14*(02), 193–202.

Stephen, J., Manullang, E., & Lumbantobing, D. (2023). *PLTU GROWTH ASIA*.

04(02), 45–58.

Studi, P., Elektro, T., Teknik, F., & Agung, U. D. (2023). *ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF CHANGING LOADS ON*. *7*(1). https://doi.org/10.31289/jesce.v6i2.10194

Syahputra, R., Nugroho, A. W., Nur, A., Chamim, N., & Prasetyo, T. I. (2024). *Performance Analysis of Synchronous Generator : A Case Study in Steam Power Plant at PT POMI Paiton Unit 7 Probolinggo , East Java , Indonesia*. *2*(4), 144–152.

Syalsabila, J., Putri, F., & Hb, I. (2023). *ANALISA EFISIENSI THERMAL BOILER TIPE CIRCULATION FLUIDIZED BED DI PLTU 3x10MW*. *4*(3), 159–166.

Tabaka, P. (2022). *Analysis of the Spectral Sensitivity of Luxmeters and Light Sensors of Smartphones in Terms of Their Influence on the Results of Illuminance Measurements — Example Cases*.

Takwanto, N. F. dan A. (2025). *EVALUASI PERFORMA SIKLUS PEMBANGKIT STEAM MENGGUNAKAN SIKLUS RANKINE DENGAN PERBANDINGAN PENAMBAHAN HEATER DAN TANPA HEATER PADA UNIT UTILITAS INDUSTRI PUPUK*. *11*(9), 490–497.

Wahyu, M., Nurlina, N., & Irawan, D. (2023). Multitek Indonesia : Jurnal Ilmiah Multitek Indonesia : Jurnal Ilmiah. *Multitek Indonesia: Jurnal Ilmiah*, *17*(1), 60–68.

Wijaya, A. A., Utomo, B., & Widodo, K. (2021). *The Effect of Feedwater Heaters Operation Schemes to a 200 MW Steam Power Plant Heat Rate Using Cycle-Tempo Software*. *4*(3), 3–7.

Yawan Fauzy Dharmawan, et al. (2024). *ANALISIS EFISIENSI KINERJA GENERATOR PLTU*. 1–8.

Zein, R., Mesin, S. T., Teknik, F., Medan, U. H., Utara, S., Studi, P., Mesin, T., Teknik, F., Medan, U. H., Utara, S., Rate, H., & Thermal, E. (2023). *Jurnal Laminar*. *5*, 2721–2726.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Surat Permohonan Izin Pengambilan Data dari Universitas



MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN & PENGEMBANGAN PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA

FAKULTAS TEKNIK

UMSU Terakreditasi Unggul Berdasarkan Keputusan Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi No. 174/SK/BAN-PT/Ak.PpjPT/III/2024
Pusat Administrasi: Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6622400 - 66224567 Fax. (061) 6625474 - 6631003
https://fatek.umsu.ac.id fatek@umsu.ac.id umsumedan umsumedan umsumedan umsumedan

Nomor : 1804/II.3.AU/UMSU-07/B/2026
Lamp : -
Hal : **Pengambilan Data**

Medan, 11 Rabiul Awal 1448 H
24 Agustus 2026 M

Kepada Yth.: Bapak/Ibu Pimpinan
PT Perkebunan Nusantara IV Regional I
Di - Tempat

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Dengan hormat,

Kami memohon kesediaan Bapak/Ibu untuk menerima dan memberikan izin mahasiswa kami yang akan melakukan Pengambilan Data di **PT Perkebunan Nusantara IV Regional I PKS Sei Daun**, untuk penulisan Tugas Akhir, guna menyelesaikan program pendidikan Strata Satu (S-1) di Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Nama	:	**Deni Ade Afriansyah**
NPM	:	2207220061
Prodi	:	Teknik Elektro
Judul Tugas Akhir	:	Analisis Kinerja Pembangkit Listrik Tanaga Uap (PLTU) Di PT Perkebunan Nusantara IV Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun Labuhan Batu Selatan
Pembimbing	:	**Noorly Evalina, S.T, MT.**

Adapun data Perusahaan yang akan diminta sebagai berikut:
1. Data spesifikasi dan kapasitas PLTU, Data operasional boiler, turbin dan generator, Data Penggunaan bahan bakar biomassa berupa fiber dan cangkang
2. Data produksi dan penggunaan steam/uap, Data pembangkitan energi listrik, Data beban atau pemakaian listrik selama periode penelitian

Demikianlah, harapan kami atas bantuan dan kerjasama Bapak/Ibu kami ucapkan terima kasih.
Wassalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh.

Dekan,

Ir. Ade Faisal, ST, M.Sc., Ph.D.
NIDN: 0123097203

Dipindai dengan CamScanner

Lampiran 2 Surat Izin Pengambilan Data dari PT Perkebunan Nusantara Iv Regional I Pabrik Kelapa Sawit Sei Daun Labuhan Batu Selatan

PT.PERKEBUNAN NUSANTARA 4
REGIONAL 1
Alamat: Desa Sei Meranti, Kec.Torgamba, Kab.Labuan Batu Selatan
Telp. (061)8452244 | Email: psdan@ptpn3.com

SURAT BALASAN / PERSETUJUAN PENGAMBILAN DATA

Nomor: 1 PSD/038/VIII/2026

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama	: ANAS RAMLI TANJUNG
Jabatan	: ASISTEN TEKNIK
Perusahaan	: PTPN 4_REGIONAL 1_1 PSD
Alamat	: Perumahan PKS Sei DAUN

Dengan ini menerangkan bahwa pihak perusahaan **memberikan izin/persetujuan** kepada:

Nama	: Deni Ade Afriansyah
NPM	: 2207220061
Program Studi	: Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
Judul Skripsi	: **ANALISIS KINERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) DI PT PERKEBUNAN NUSANTARA IV REGIONAL I PABRIK KELAPA SAWIT SEI DAUN LABUHAN BATU SELATAN**

untuk melakukan pengambilan data di PTPN 4 Regional 1 sebagai keperluan penyusunan tugas akhir/skripsi.

Adapun data yang dapat diberikan oleh pihak perusahaan untuk mendukung pelaksanaan penelitian tersebut meliputi:

- Data spesifikasi dan kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).
- Data operasional boiler, turbin, dan generator.
- Data penggunaan bahan bakar biomassa berupa fiber dan cangkang.
- Data produksi dan penggunaan steam/uap.
- Data pembangkitan energi listrik.
- Data beban atau pemakaian listrik selama periode penelitian.

Dipindai dengan CamScanner

• Data pendukung lain yang berkaitan dengan kebutuhan penelitian dan dapat diberikan oleh perusahaan.

Pengambilan data tersebut dilaksanakan dengan ketentuan bahwa data yang diperoleh hanya digunakan untuk kepentingan akademik/penelitian dan tidak diseharluaskan untuk kepentingan lain tanpa persetujuan pihak perusahaan.

Demikian surat balasan/persetujuan ini dibuat untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya. Atas kerja sama dan perhatian yang diberikan, kami ucapkan terima kasih.

PKS Sei Daun, 07 Februari 2026
PTPN 4 Regional 1



AZHARUL
Manajer

Dipindai dengan CamScanner

DOKUMENTASI







