



Analisis Efisiensi *Main Transformator* Terhadap Variasi Pembebanan Pada Unit 1 PLTU PT. TJK POWER 2×65 MW

Tugas Akhir

**Oleh:
Anbiya Jatsiyah Lubis (4232201040)**

**Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi
Jurusan Teknik Elektro
Politeknik Negeri Batam
2026**

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir

Saya yang bertandatangan dibawah ini menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya yang berjudul : “Analisis Efisiensi *Main Transformator* Terhadap Variasi Pembebanan Pada Unit 1 PLTU PT. TJK POWER 2 × 65 MW” adalah **hasil karya sendiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan, dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.** Semua referensi yang dikutip atau dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan saya ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Batam, 13 Mei 2026



ANBIYA JATSIYAH LUBIS

NIM: 4232201040

Lembar Pengesahan

Tugas Akhir disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T)
di
Politeknik Negeri Batam

Oleh:
ANBIYA JATSIYAH LUBIS (4232201040)
Tanggal Sidang: 13 Mei, 2026

Disetujui oleh :

1. Penguji 1



Dr. Ir. Didi Istardi, S.T.,M.Sc
NIK: 102022

1. Pembimbing



Handri Toar S.ST., M.Tr.T
NIK: 113114

2. Penguji 2



Hasnira, S.ST., M.Tr.T
NIK: 113112

Analisis Efisiensi *Main Transformator* Terhadap Variasi Pembebanan Pada Unit 1 PLTU PT. TJK POWER 2×65 MW

Abstrak

PLTU PT. TJK POWER merupakan salah satu pembangkit listrik terbesar yang berperan penting dalam memenuhi kebutuhan listrik kota Batam. Pola pembebanan yang dilayani bersifat fluktuatif karena diatur oleh *Batam Centre Control* (BCC), sehingga menyebabkan variasi rugi-rugi daya pada *Main Transformator* yang berpotensi menurunkan efisiensi dan usia pakai transformator. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi pembebanan terhadap efisiensi, menghitung rugi-rugi daya pada kondisi beban 40 MW, 45 MW, dan 50 MW, serta mengevaluasi kinerja *Main Transformator* Unit 1 PLTU PT. TJK POWER 2×65 MW periode September hingga Desember 2025. Metode yang digunakan adalah perhitungan matematis menggunakan data operasional harian, mencakup perhitungan daya semu, rugi-rugi tembaga, rugi-rugi inti, rugi total, dan efisiensi transformator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan beban menyebabkan kenaikan rugi-rugi tembaga yang proporsional terhadap kuadrat arus beban, sementara rugi-rugi inti bersifat konstan sebesar 0,03857 MW. Beban 45 MW terbukti sebagai titik operasi paling optimal dengan efisiensi tertinggi mencapai 99,22%, sedangkan beban 50 MW merupakan titik operasi paling stabil dan konsisten. Efisiensi transformator selama periode penelitian berada pada rentang 99,05% hingga 99,24%, mencerminkan bahwa *Main Transformator* Unit 1 PLTU PT. TJK POWER masih beroperasi dalam kondisi yang sangat baik dan andal.

Kata kunci: efisiensi, main transformator, rugi-rugi daya, variasi pembebanan.

Analysis of Main Transformer Efficiency Against Load Variations at Unit 1 of PT. TJK POWER 2 × 65 MW Steam Power Plant

Abstract

PLTU PT. TJK POWER is one of the largest power plants that plays an important role in meeting the electricity needs of Batam city. The load pattern served is fluctuating because it is regulated by the Batam Center Control (BCC), thus causing variations in power losses in the Main Transformer which have the potential to reduce the efficiency and service life of the transformer. This study aims to determine the effect of load variations on efficiency, calculate power losses under load conditions of 40 MW, 45 MW, and 50 MW, and evaluate the performance of the Main Transformer Unit 1 of PLTU PT. TJK POWER 2 × 65 MW for the period September to December 2025. The method used is mathematical calculations using daily operational data, including calculations of apparent power, copper losses, core losses, total losses, and transformer efficiency. The results show that increasing the load causes an increase in copper losses proportional to the square of the load current, while core losses are constant at 0.03857 MW. A load of 45 MW proved to be the most optimal operating point with the highest efficiency reaching 99.22%, while a load of 50 MW was the most stable and consistent operating point. Transformer efficiency during the study period ranged from 99.05% to 99.24%, indicating that the Main Transformer of Unit 1 of the PT. TJK POWER Steam Power Plant is still operating in excellent and reliable condition.

Keywords: efficiency, main transformer, power losses, load variation.

Kata Pengantar

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala limpahan rahmat, hidayah, serta karunia-Nya yang tiada terhingga, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan sebaik-baiknya. Shalawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad Shallallahu 'Alaihi Wasallam, beserta keluarga dan para sahabat beliau.

Tugas akhir yang berjudul "*Analisis Efisiensi Main Transformator Terhadap Variasi Pembebanan Pada Unit 1 PLTU PT. TJK POWER 2 × 65 MW*" ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi di Politeknik Negeri Batam. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam proses penyusunan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dukungan, serta doa yang tulus dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kepada Ayahanda Alm. Erry Surya Lubis dan Ibunda Siti Maryam yang penulis cintai dan banggakan, terima kasih yang tiada tara atas segala kasih sayang, pengorbanan, doa yang tidak pernah putus, serta dukungan moral maupun material yang telah diberikan dengan sepenuh hati sepanjang perjalanan hidup dan pendidikan penulis. Tidak ada kata yang cukup mampu mengungkapkan betapa besarnya rasa syukur dan terima kasih penulis atas segalanya. Semoga Allah senantiasa melimpahkan kesehatan, kebahagiaan, dan keberkahan kepada Ayahanda dan Ibunda tercinta.
2. Kepada Bapak Handri Toar S.ST., M.Tr.T, selaku dosen pembimbing tugas akhir, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala waktu, ilmu, kesabaran, serta bimbingan yang telah diberikan dengan penuh dedikasi. Arahkan, saran, dan koreksi yang Bapak/Ibu berikan menjadi cahaya penerang yang sangat berarti dalam proses penyusunan tugas akhir ini. Semoga ilmu dan kebaikan Bapak/Ibu senantiasa mendapatkan balasan yang berlipat ganda dari Allah Subhanahu Wa Ta'ala.
3. Kepada Kakak/Abang [dr. Nichia Defira Al Rahim Lubis/ Muhammad Ryantama Lubis S.T. yang penulis sayangi dan kagumi, terima kasih atas segala perhatian, nasihat, motivasi, serta semangat yang senantiasa diberikan di setiap langkah perjalanan penulis. Kehadiran Kakak/Abang selalu menjadi sumber kekuatan dan inspirasi bagi penulis untuk terus berjuang dan tidak mudah menyerah. Semoga Allah senantiasa memberikan kelancaran dan keberkahan dalam setiap urusan Kakak/Abang.
4. Kepada Fadhillah Salsahbillah dan seluruh sahabat serta teman-teman terdekat penulis, terima kasih atas pertemanan dan keakraban yang tulus, kebersamaan yang penuh kehangatan, serta dukungan dan semangat yang

selalu hadir di saat-saat paling penulis butuhkan. Canda, tawa, dan perjuangan yang kita lalui bersama menjadi kenangan yang akan selalu penulis syukuri. Semoga persahabatan kita senantiasa terjaga dan menjadi ikatan yang membawa kebaikan bagi kita semua.

5. Kepada seluruh rekan-rekan yang telah bersama-sama menjalani masa magang, terima kasih atas kebersamaan, kerjasama, serta suasana yang menyenangkan selama menjalani proses magang. Pengalaman berharga yang kita bagikan bersama telah memberikan pelajaran hidup yang sangat bermakna bagi penulis.
6. Kepada Ibu Heli Leo beserta seluruh jajaran karyawan, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas kesempatan, kepercayaan, serta bimbingan yang telah diberikan selama pelaksanaan magang. Pengalaman dan wawasan nyata yang penulis dapatkan selama berada di lingkungan kerja yang profesional ini sungguh memberikan nilai tambah yang luar biasa bagi pengembangan diri dan penyelesaian tugas akhir penulis. Semoga PT. TJK POWER senantiasa berkembang dan meraih kesuksesan yang lebih gemilang.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari berbagai pihak demi perbaikan dan penyempurnaan tugas akhir ini. Akhir kata, penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat yang berarti bagi penulis sendiri, pembaca, serta bagi perkembangan ilmu pengetahuan di bidang yang bersangkutan.

Daftar Isi

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir	i
Lembar Pengesahan	ii
Abstrak	iii
<i>Abstract</i>	iv
Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	x
Daftar Tabel	xi
Bab 1. Pendahuluan	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	2
1.4. Manfaat	2
1.5. Batasan	3
Bab 2. Tinjauan Pustaka	4
2.1. Pengertian Transformator	4
2.2. Jenis-jenis Transformator	5
2.2.1. Transformator <i>Step Up</i>	5
2.2.2. Transformator <i>Step Down</i>	6
2.3. Bagian-bagian Transformator	7
2.3.1. Inti Besi Transformator	7
2.3.2. Kumpuran Transformator	7
2.3.3. Minyak Transformator	8
2.3.4. <i>Bushing</i> Transformator	9
2.3.5. Tangki dan Konservator Transformator	9
2.3.6. Sistem Pendingin Transformator	10

2.3.7. Breather Transformator	11
2.3.8. Radiator dan Kipas Pendingin.....	11
2.4. Prinsip Kerja Transformator	12
2.5. Hubungan Pada Tranformator 3 phase	12
2.5.1. Transformator Hubung Bintang Bintang (Y-Y)	12
2.5.2. Transformator Hubung Segitiga Segitiga (Δ - Δ)	13
2.5.3. Transformator Hubung Bintang Segitiga (Y - Δ)	13
2.5.4. Transformator Hubungan Segitiga Bintang (Δ - Y)	13
2.5.5. Transformator Hubungan Zig - Zag.....	13
2.6. Sistem Proteksi Transformator.....	14
2.7. Efisiensi Transformator	15
2.7.1. Daya Semu.....	15
2.7.2. Rugi-rugi Tembaga.....	15
2.7.3. Rugi-rugi Inti	16
2.7.4. Efisiensi.....	16
Bab 3. Metodologi Penelitian / Metode Pelaksanaan	18
3.1. Perancangan.....	18
3.2. Lokasi Penelitian.....	19
3.3. Observasi Lapangan	19
3.4. Metode Penelitian.....	19
3.5. Objek Penelitian	20
3.6. Model Penelitian	20
Bab 4. Hasil dan Pembahasan	22
4.1. Data Hasil Penelitian	22
4.1.1. Data Spesifikasi Transformator	22
4.1.2. Data Logsheet Transformator.....	22
4.1.3. Perhitungan Efisiensi Transformator.....	27
4.1.4. Analisis Grafik Variasi Pembebanan vs Total Rugi-Rugi dan Efisiensi	33

4.1.5. Analisis Grafik Pembebanan vs Arus dan Efisiensi	37
4.1.6. Analisis Grafik Rata-rata Beban vs Efisiensi	42
4.1.7 Analisis Karakteristik Hubungan Beban terhadap Efisiensi Melalui Integrasi Data	44
4.1.8. Analisis Integrasi Hubungan Pembebanan terhadap Rugi-Rugi Total dan Efisiensi.....	44
4.2. Pembahasan Analisis Penelitian	45
4.2.1. Analisis Data	45
4.2.2. Pembahasan Tren dan Pola Keseluruhan	47
BAB 5 Kesimpulan dan Saran.....	50
5.1 Kesimpulan	50
5.2 Saran	52
Daftar Pustaka	53

Daftar Gambar

Gambar 1 Prinsip Hukum Elektromagnetik[3]	4
Gambar 2 Elektromagnetik Transformator[3]	5
Gambar 3 Transformator <i>Step Up</i> [6]	6
Gambar 4 Transformtor <i>Step Down</i> [6]	6
Gambar 5 jenis inti Magnet Transformator[4]	7
Gambar 6 Kumparan Transformator[9]	8
Gambar 7 <i>Bushing</i> Transformator[10]	9
Gambar 8 Tangki dan Konservator[10]	10
Gambar 9 Diagram Alir	18
Gambar 10 Lokasi PLTU PT TJK POWER[15]	19
Gambar 11 Transformator di PT TJK POWER	20
Gambar 12 Grafik Pembebanan terhadap Total Rugi-Rugi Dan Efisiensi pada bulan September 2025	34
Gambar 13 Grafik Pembebanan terhadap Total Rugi-Rugi Dan efisiensi pada bulan Oktober 2025	35
Gambar 14 Grafik Pembebanan terhadap Total Rugi-Rugi Dan Efisiensi pada bulan November 2025	36
Gambar 15 Grafik Pembebanan terhadap Total Rugi-Rugi Dan Efisiensi pada bulan Desember 2025	37
Gambar 16 Grafik Pembebanan terhadap Arus Dan Efisiensi pada bulan September 2025	38
Gambar 17 Grafik Pembebanan terhadap Arus Dan Efisiensi pada bulan Oktober 2025	39
Gambar 18 Grafik Pembebanan terhadap Arus Dan Efisiensi pada bulan November 2025	40
Gambar 19 Grafik Pembebanan terhadap Arus Dan Efisiensi pada bulan Desember 2025	41
Gambar 20 Grafik Rata-rata Beban vs Efisiensi 2025	42
Gambar 21 Hubungan Beban terhadap Efisiensi September – Desember 2025 ..	44
Gambar 22 Hubungan Pembebanan terhadap Rugi-Rugi Total dan Efisiensi Periode September - Desember 2025	45

Daftar Tabel

Tabel 1 Jenis-jenis relay yang ada pada transformator	14
Tabel 2 Spesifikasi teknis transformator	22
Tabel 3 Data Bulan September 2025	23
Tabel 4 Data Bulan Oktober 2025	24
Tabel 5 Data Bulan November 2025.....	25
Tabel 6 Data Bulan Desember 2025	26
Tabel 7 Total rugi-rugi dan efisiensi pada transformator bulan September	28
Tabel 8 Total rugi-rugi dan efisiensi pada transformator bulan Oktober	29
Tabel 9 Total rugi-rugi dan efisiensi pada transformator bulan November	30
Tabel 10 Total rugi-rugi dan efisiensi pada transformator bulan Desember.....	31
Tabel 11 Rekapitulasi Rata-rata perbulan	33

Bab 1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Perkembangan aspek kehidupan di zaman sekarang membuat energi listrik menjadi salah satu kebutuhan pokok masyarakat di zaman modern saat ini, hampir seluruh peralatan-peralatan yang digunakan untuk membantu kehidupan manusia menggunakan energi listrik. Konsumen energi listrik bukan saja dari kalangan rumah tangga tetapi juga dari kalangan komersial, industri maupun pelayanan jasa dan pelayanan umum. Secara umum sistem tenaga listrik diawali dari unit pembangkit energi listrik kemudian disalurkan melalui sistem transmisi tegangan tinggi dan kemudian melalui sistem distribusi untuk disalurkan kepada konsumen. Untuk memenuhi kebutuhan energi listrik diperlukan sarana dan prasarana yang baik untuk menyalurkan energi listrik dari penyedia sampai ke konsumen energi listrik[1].

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di PT. TJK POWER merupakan salah satu pembangkit listrik terbesar yang berperan penting dalam memenuhi kebutuhan listrik khususnya di kota Batam. PT. TJK POWER memiliki dua unit transformator utama, transformator ini berfungsi untuk menaikkan tegangan listrik dari pembangkit ke tingkat yang sangat tinggi untuk transmisi jarak jauh guna mengurangi kehilangan energi dan meningkatkan efisiensi. Akan tetapi dalam penyaluran energi listrik tidak seluruhnya sampai karena akan hilang dalam bentuk susut energi. salah satu cara untuk mengurangi susut energi kita harus memperhatikan rugi-rugi daya seperti rugi inti dan rugi tembaga. Dimana semakin kecil rugi daya maka semakin kecil juga energi yang hilang dalam penyaluran energi listrik[2].

Dalam pengelolaan produksi energi listrik, permintaan listrik setiap harinya selalu fluktuatif yang diatur oleh *Batam Centre Control* (BCC), sehingga menyebabkan rugi-rugi daya yang signifikan pada transformator. Rugi-rugi daya yang terjadi selama proses penyaluran energi listrik juga menjadi perhatian utama, karena rugi-rugi daya dapat meningkat seiring dengan kenaikan arus transformator akibat perubahan beban. Hal tersebut dapat meningkatkan kebutuhan daya *input* untuk menghasilkan daya *output* yang diinginkan, sehingga dapat menyebabkan penurunan efisiensi pada transformator. Oleh karena itu, penting untuk mengidentifikasi hubungan antara besarnya beban dan tingkat rugi daya yang terjadi, serta bagaimana hal ini berkontribusi terhadap penurunan kinerja dan efisiensi pada transformator[2].

Pola pembebanan yang dilayani oleh PLTU PT. TJK POWER bersifat fluktuatif, karena sebagian besar konsumsi energi listrik di kota Batam diperuntukkan kepada pelanggan sektor rumah tangga. Beban yang bersifat fluktuatif ini menimbulkan rugi-rugi pada transformator. Ketika suatu transformator diberi energi akan timbul

rugi-rugi inti, rugi-rugi kumparan dan rugi-rugi bocor merupakan sumber panas dan kenaikan suhu kumparan dan minyak transformator. Kinerja transformator daya ditentukan melalui parameter rugi-rugi daya (*losses*) yang terjadi pada transformator. Jika terjadi rugi-rugi pada inti besi dapat menyebabkan timbulnya panas dan getaran yang berlebih pada transformator sehingga menyebabkan nilai efisiensi dan usia pakai transformator (*loss of life*) menjadi berkurang. Dengan mengidentifikasi dan menganalisis berbagai permasalahan ini, peneliti mengambil judul “Analisis Efisiensi *Main Transformer* Terhadap Variasi Pembebanan Pada Unit 1 PLTU PT. TJK POWER 2 × 65 MW”.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh variasi pembebanan terhadap efisiensi transformator di PLTU PT. TJK POWER Unit 1?
2. Bagaimana cara menghitung rugi-rugi daya (*losses*) dan efisiensi transformator pada kondisi beban 40MW, 45MW dan 50MW.?
3. Bagaimana kondisi kinerja transformator di PLTU PT. TJK POWER Unit 1 berdasarkan hasil perhitungan jika dalam kondisi variasi pembebanan?

1.3. Tujuan

1. Mengetahui pengaruh variasi pembebanan terhadap efisiensi transformator di PLTU PT. TJK POWER Unit 1.
2. Menganalisis dan menghitung rugi-rugi daya (*losses*) serta menentukan beban optimal yang menghasilkan efisiensi terbaik pada kondisi pembebanan fluktuatif (40 MW, 45 MW dan 50 MW).
3. Mengevaluasi kinerja transformator di PLTU PT. TJK POWER Unit 1 berdasarkan hasil perhitungan pada kondisi variasi pembebanan.

1.4. Manfaat

Manfaat yang didapat dalam penelitian ini adalah:

1. Memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh variasi pembebanan terhadap efisiensi transformator di PLTU PT. TJK POWER Unit 1, sehingga dapat menjadi dasar dalam pengoperasian transformator secara optimal.
2. Menyediakan data dan hasil analisis mengenai rugi-rugi daya (*losses*) serta tingkat efisiensi transformator pada berbagai kondisi pembebanan fluktuatif, yang dapat digunakan sebagai acuan dalam perawatan dan pengendalian beban transformator.
3. Memberikan evaluasi terhadap kondisi kinerja transformator berdasarkan variasi pembebanan, sehingga dapat dijadikan bahan pertimbangan dalam peningkatan keandalan dan efisiensi sistem kelistrikan di PLTU PT. TJK POWER Unit 1.

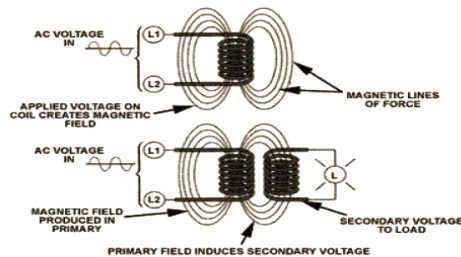
1.5. Batasan

1. Penelitian ini akan difokuskan pada efisiensi satu unit main transformator yang beroperasi di PLTU PT. TJK POWER. Tidak menganalisis semua transformator dalam suatu sistem kelistrikan.
2. Variasi pembebanan yang akan dianalisis hanya mencakup kondisi beban yang direkomendasi dari pihak BCC.
3. Analisis efisiensi hanya akan dilakukan berdasarkan perhitungan matematis menggunakan data operasional yang ada.
4. Pembahasan rugi-rugi daya akan dibatasi pada dua jenis utama, yaitu:
 - Rugi-rugi Inti (rugi-rugi besi): Rugi-rugi ini dianggap konstan karena tidak dipengaruhi oleh variasi beban dan akan dihitung berdasarkan data pengujian tanpa beban (*no-load test*).
 - Rugi-rugi Tembaga (rugi-rugi beban): Rugi-rugi ini bergantung pada besarnya arus beban dan akan dihitung berdasarkan data pembebanan pada transformator.
5. Penelitian tidak akan memperhitungkan faktor-faktor eksternal lain yang memengaruhi efisiensi trafo secara signifikan, seperti:
 - Kondisi lingkungan (suhu, kelembapan)
 - Kualitas minyak isolasi
 - Faktor usia trafo (penuaan)
 - Kerusakan atau kegagalan internal trafo
6. Data yang digunakan hanya berasal dari periode waktu tertentu (misalnya, perbulan, pertahun).

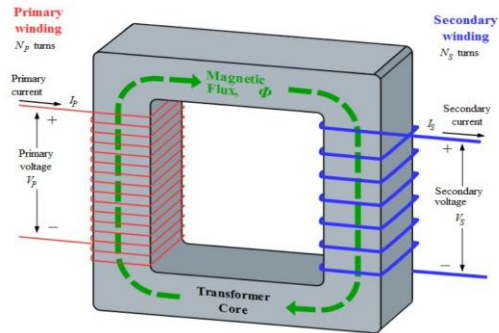
Bab 2. Tinjauan Pustaka

2.1. Pengertian Transformator

Transformator merupakan peralatan listrik statis yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, dimana arus bolak-balik pada belitan primer menghasilkan fluks magnet bolak-balik yang mengalir melalui inti besi berlapis. Fluks magnet ini kemudian menghubungkan belitan sekunder dan menginduksi tegangan pada terminal keluarannya. Konsep ini sesuai dengan Hukum *Ampere* (arus menghasilkan medan magnet) dan Hukum Induksi Faraday (perubahan fluks magnet menghasilkan tegangan). Transformator memindahkan energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lain tanpa kontak listrik langsung, sehingga frekuensi tetap sama[3]. Prinsip hukum elektromagnetik dapat dilihat pada gambar 1.



Secara konstruksi, transformator terdiri dari inti besi berlapis (*laminated core*) sebagai jalur fluks magnet serta dua atau lebih belitan yaitu belitan primer dan sekunder. Perbandingan jumlah lilitan antar kedua belitan menentukan rasio tegangan dan arus antara sisi primer dan sekunder, sehingga transformator dapat berfungsi sebagai penaik tegangan (*step-up*) maupun penurun tegangan (*step-down*). Transformator digunakan secara luas dalam sistem tenaga listrik karena memungkinkan pemilihan tegangan yang ekonomis, misalnya penyaluran daya jarak jauh pada tegangan tinggi untuk mengurangi rugi-rugi transmisi, serta dalam elektronika untuk isolasi galvanik dan penyesuaian impedansi antar rangkaian. Gambar 2 adalah fluks magnet yang menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial atau tegangan induksi[4][5].



Gambar 2 Elektromagnetik Transformator[3]

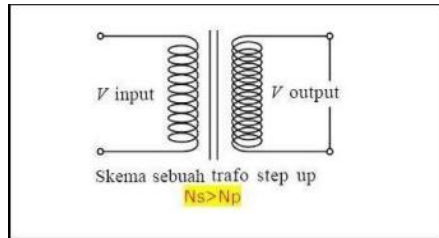
2.2. Jenis-jenis Transformator

Transformator dapat dibedakan berdasarkan dari banyak faktor, pada umumnya dapat dibedakan berdasarkan cara kerja, fungsinya, kapasitasnya dan lainnya.

2.2.1. Transformator *Step Up*

Transformator *step-up* adalah transformator yang digunakan untuk menaikkan tegangan listrik dari sisi primer ke sisi sekunder. Transformator ini memiliki jumlah lilitan sekunder lebih banyak dibandingkan jumlah lilitan primer sehingga mampu menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi. Dalam transformator *step-up*, tegangan sekunder selalu lebih besar daripada tegangan primer sehingga sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan peningkatan level tegangan pada sistem tenaga agar peningkatan tegangan dapat dicapai sesuai kebutuhan sistem.

Sebaliknya, kuat arus pada sisi primer lebih besar dibandingkan kuat arus pada sisi sekunder karena mempertahankan keseimbangan daya pada kondisi ideal. Transformator *step-up* banyak diterapkan pada pembangkit tenaga listrik, terutama untuk menaikkan tegangan keluaran generator sebelum disalurkan ke jaringan transmisi jarak jauh. Penggunaan transformator *step-up* tersebut bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi daya selama proses transmisi sehingga lebih efisien dan ekonomis. Skema trafo *step-up* dapat dilihat pada gambar (3) [3][6].

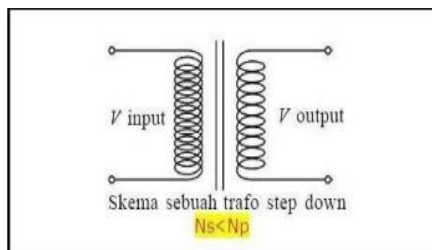


Gambar 3 Transformator *Step Up* [6]

2.2.2. Transformator *Step Down*

Transformator *step-down* merupakan perangkat elektromagnetik yang dirancang untuk mereduksi nilai tegangan listrik dari sisi primer menuju sisi sekunder. Pada jenis transformator ini, perbandingan jumlah lilitan menjadi aspek utama dalam proses penurunan tegangan, di mana kumparan sekunder memiliki lilitan lebih sedikit dibandingkan kumparan primer sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang lebih rendah. Perbedaan jumlah lilitan tersebut menciptakan rasio tegangan yang sesuai dengan prinsip dasar transformasi tegangan dalam sistem induksi elektromagnetik..

Dalam penerapannya, transformator *step-down* banyak digunakan pada sistem distribusi tenaga listrik maupun perangkat elektronik seperti adaptor AC–DC yang membutuhkan penyesuaian tegangan sebelum dialirkan ke rangkaian penyearah dan beban. Desain transformator ini disesuaikan dengan kebutuhan operasional sehingga konfigurasi inti dan jumlah lilitan ditetapkan untuk memperoleh keluaran tegangan yang aman, stabil, dan sesuai spesifikasi. Dengan demikian, keberadaan transformator *step-down* berperan penting dalam menjaga keandalan dan efisiensi suplai energi pada level tegangan rendah[3][6]. Skema trafo *step-down* bisa dilihat pada gambar 4.

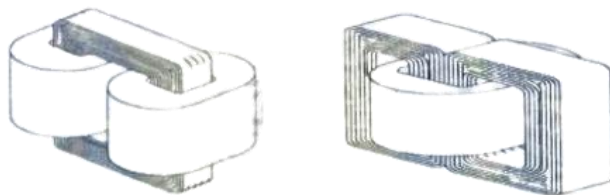


Gambar 4 Transformtor *Step Down* [6]

2.3. Bagian-bagian Transformator

2.3.1. Inti Besi Transformator

Transformator secara konstruktif memiliki dua kategori utama inti magnet, yaitu tipe inti (*core type*) dan tipe cangkang (*shell type*), yang dibedakan berdasarkan arah aliran fluks magnet dalam material inti. Pada tipe inti, lembaran baja silikon disusun membentuk struktur persegi atau persegi panjang dan kumparan ditempatkan pada dua kaki inti tersebut untuk memastikan proses induksi elektromagnetik berlangsung optimal[4]. Sebaliknya, pada tipe cangkang, kumparan dipasang di bagian tengah inti yang terlindungi oleh susunan laminasi baja di sekelilingnya, sehingga memberikan jalur fluks magnet yang simetris dan lebih tertutup[7]. Inti digunakan sebagai media utama penghantar fluks magnet yang ditimbulkan arus listrik pada kumparan untuk memastikan efisiensi transformasi energi listrik dalam sistem tenaga[3]. Jenis inti magnet pada transformator bisa dilihat pada gambar 5.



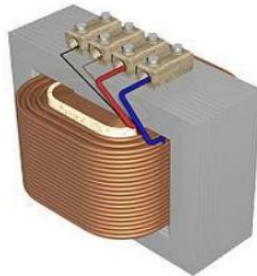
a. jenis inti
b. jenis cangkang
Gambar 5 jenis inti Magnet Transformator[4]

Material inti umumnya menggunakan baja silikon berlaminasi dengan kandungan silikon rendah untuk meningkatkan permeabilitas magnetik dan mengurangi rugi histeresis. Setiap laminasi diberikan isolasi antarlapisan untuk menekan terjadinya arus pusar (*eddy current*), sehingga meminimalkan panas berlebih dan rugi-rugi besi selama operasi transformator. Struktur laminasi dijepit dengan kuat untuk mencegah getaran mekanis yang dapat mengganggu keandalan peralatan[3]. Dari aspek kekuatan mekanis, tipe cangkang memiliki keunggulan karena distribusi gaya elektromagnetik lebih stabil saat terjadi arus hubung singkat, sehingga lebih andal digunakan pada transformator dengan tuntutan beban tinggi dalam sistem tenaga listrik seperti pembangkit dan transmisi[4][7].

2.3.2. Kumpuran Transformator

Transformator terdiri dari dua kumparan utama, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder, yang berfungsi sebagai media transfer energi listrik melalui

prinsip induksi elektromagnetik. Kumparan primer menerima suplai arus bolak-balik sehingga menghasilkan fluks magnet bolak-balik pada inti besi, yang kemudian menginduksi tegangan pada kumparan sekunder berdasarkan besarnya perbandingan jumlah lilitan pada kedua belitan tersebut. Perubahan jumlah lilitan menghasilkan perbedaan nilai tegangan pada sisi primer dan sekunder sehingga transformasi naik (*step-up*) atau turun (*step-down*) dapat terjadi tanpa adanya kontak listrik langsung antar kumparan[4][8]. Visualisasi kumparan pada transformator bisa dilihat pada gambar 6.



Gambar 6 Kumparan Transformator[9]

Setiap kumparan dibentuk dari lilitan kawat berisolasi, dan diberikan isolasi dielektrik tambahan untuk memastikan tidak terjadi hubungan listrik dengan inti besi maupun antar kumparan lain, menggunakan material seperti karton listrik atau pertinax untuk menjaga keselamatan operasi dan keandalan sistem. Ketika rangkaian sekunder terhubung pada beban, aliran arus akan muncul sejalan dengan tegangan induksi yang dihasilkan, sehingga kumparan menjalankan fungsi utama sebagai komponen transformasi tegangan dan arus dalam sistem tenaga listrik[3][8].

2.3.3. Minyak Transformator

Minyak transformator merupakan media penting dalam sistem isolasi dan pendinginan transformator, terutama pada transformator daya berkapasitas besar[8]. Komposisi minyak yang terdiri dari senyawa seperti *naftalena*, *parafin*, dan *aromatik* memberikan sifat termal dan dielektrik yang baik sehingga mampu menyerap serta memindahkan panas dari inti dan kumparan untuk menjaga stabilitas suhu selama operasi. Selain itu, minyak mampu mengisi celah-celah kecil di dalam struktur transformator dan mencegah loncatan listrik, menjadikannya lebih unggul dibanding isolasi berbasis gas[4][7].

Untuk memastikan fungsinya tetap optimal, minyak transformator harus memenuhi standar teknis seperti kekuatan tembus listrik yang tinggi, viskositas rendah untuk memudahkan sirkulasi, titik nyala tinggi untuk meminimalkan risiko

kebakaran, serta stabilitas kimia agar tidak merusak material lain pada transformator[3]. Pengujian rutin diperlukan guna memastikan tidak terjadi kontaminasi seperti masuknya air atau partikel konduktif yang dapat menurunkan kemampuan isolasi[7]. Dengan fungsi ganda tersebut, minyak transformator menjadi komponen vital dalam menjaga keandalan, efisiensi, dan umur operasional transformator[8].

2.3.4. Bushing Transformator

Bushing merupakan komponen isolatif pada transformator yang berfungsi sebagai jalur penghubung antara kumparan transformator dan jaringan listrik eksternal, sehingga arus bertegangan tinggi dapat disalurkan secara aman keluar dari peralatan[3]. Dalam pengoperasiannya *bushing* dirancang dengan bukaan sekecil mungkin untuk meminimalkan risiko pelepasan muatan listrik atau gangguan pada sistem pembumian transformator. Konduktor pada *bushing* membawa arus dari bagian dalam ke terminal luar dan bekerja pada kondisi tegangan tinggi sehingga memerlukan sistem isolasi yang sangat andal[4].

Konstruksi utama *Bushing* terdiri dari konduktor atau inti sebagai penghantar arus, bahan dielektrik sebagai isolasi, serta flens logam yang mengikat bagian isolator ke tangki transformator yang dibumikan[7]. Material isolasi seperti porselen digunakan untuk melapisi konduktor dan sekaligus bertindak sebagai penyekat antara penghantar tegangan dan tangki transformator agar tidak terjadi hubungan listrik dengan bagian yang dibumikan. Dengan desain tersebut, *bushing* mampu memberikan perlindungan isolasi dan memastikan keandalan sistem transformator selama operasi pada tegangan tinggi[4][8]. Visualisasi *Bushing* pada transformator bisa dilihat pada gambar 7.



Gambar 7 *Bushing* Transformator[10]

2.3.5. Tangki dan Konservator Transformator

Tangki transformator merupakan wadah utama yang digunakan untuk menempatkan seluruh bagian internal transformator yang terendam minyak,

sehingga seluruh komponen tersebut tetap terlindungi dan terisolasi dengan baik selama proses operasi. Untuk mengantisipasi terjadinya pemuaian minyak akibat peningkatan suhu selama transformator bekerja, tangki dilengkapi dengan suatu sistem tambahan berupa konservator yang berfungsi sebagai ruang kompensasi perubahan volume minyak[3].

Konservator pada transformator daya ditempatkan pada posisi yang umumnya terpisah dari Bushing, sehingga memudahkan pengawasan terhadap kondisi minyak pendingin yang ada di dalamnya. Ketika suhu transformator meningkat, minyak akan mengembang, dan keberadaan konservator akan menampung peningkatan volume tersebut agar minyak tetap berada pada level yang aman dan mencegah terjadinya kontak minyak dengan udara luar secara langsung yang dapat menyebabkan penyerapan kelembaban. Dengan demikian, konservator juga berperan dalam menjaga kualitas isolasi minyak serta kestabilan sistem pendinginan transformator secara keseluruhan[11]. Visualisasi tangki beserta konservator pada transformator dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8 Tangki dan Konservator[10]

2.3.6. Sistem Pendingin Transformator

Sistem pendinginan transformator merupakan mekanisme penting dalam mempertahankan kestabilan suhu operasional, khususnya pada transformator daya yang bekerja dalam kondisi beban tinggi. Salah satu sistem pendinginan yang digunakan adalah ONAN (*Oil Natural Air Natural*), yang mengandalkan sirkulasi minyak dan udara secara alami tanpa bantuan peralatan mekanis tambahan. Perpindahan minyak panas ke bagian atas dan minyak dingin ke bawah terjadi karena perbedaan massa jenis minyak yang berubah akibat peningkatan suhu selama proses transformasi energi listrik.

Metode lain yaitu ONAF (*Oil Natural Air Forced*), di mana sirkulasi minyak tetap berlangsung secara alami, namun udara dipaksa bergerak melalui kipas angin yang digerakkan motor listrik guna meningkatkan kemampuan pendinginan saat suhu transformator naik secara signifikan. Sebagai bentuk peningkatan lebih lanjut, terdapat sistem OFAF (*Oil Forced Air Forced*) yang menggunakan pompa untuk mengalirkan minyak serta kipas untuk menggerakkan udara, sehingga efektivitas

pelepasan panas menjadi lebih tinggi dan sesuai diterapkan pada transformator dengan kapasitas daya besar[7][4].

2.3.7. Breather Transformator

Breather pada transformator merupakan komponen yang berfungsi sebagai pengatur proses pertukaran udara antara bagian dalam tangki transformator dan lingkungan luar, khususnya pada transformator yang menggunakan minyak isolasi sebagai media pendingin dan isolasi. Pengaturan ini diperlukan untuk mengimbangi perubahan volume minyak akibat fluktuasi suhu selama transformator beroperasi sehingga tekanan internal tetap stabil. *Breather* dipasang pada ujung saluran udara yang terhubung ke konservator agar udara luar masuk dan keluar melalui perangkat tersebut secara terkendali.

Selain itu, *breather* dilengkapi dengan silica gel yang berperan sebagai penyerap kelembaban dari udara yang masuk ke tangki transformator. Hal ini dilakukan untuk mencegah peningkatan kadar uap air di dalam minyak transformator yang dapat menurunkan kualitas isolasinya serta berpotensi menyebabkan gangguan dielektrik pada sistem. Dengan demikian, keberadaan *breather* menjadi elemen proteksi penting dalam menjaga kinerja, keandalan, dan umur operasional transformator secara keseluruhan[11].

2.3.8. Radiator dan Kipas Pendingin

Pada sistem pendinginan transformator, radiator berperan sebagai komponen utama dalam mempercepat proses pelepasan panas dari minyak isolasi yang telah menyerap energi panas dari inti dan kumparan selama proses operasional transformator. Minyak pendingin yang merendam seluruh bagian aktif transformator akan melakukan sirkulasi menuju radiator sehingga panas yang terbawa minyak dapat ditransfer ke lingkungan luar melalui mekanisme konduksi dan konveksi. Dengan demikian, keberadaan radiator memastikan bahwa suhu minyak tetap berada pada rentang yang aman agar kinerja dan umur isolasi transformator tetap terjaga secara optimal.

Selain itu, kipas pendingin dipasang pada bagian radiator sebagai upaya meningkatkan laju perpindahan panas melalui konveksi paksa, sehingga proses pendinginan berlangsung lebih efisien terutama pada kondisi beban tinggi atau temperatur lingkungan yang meningkat. Penambahan kipas besar ini memungkinkan sirkulasi udara yang lebih cepat melewati permukaan radiator, yang pada akhirnya mempercepat penurunan temperatur minyak sebelum kembali ke tangki utama transformator. Dengan memanfaatkan kombinasi radiator dan kipas pendingin, transformator dapat beroperasi pada stabilitas termal yang lebih baik serta meminimalkan risiko kerusakan akibat kenaikan suhu berlebih[11].

2.4. Prinsip Kerja Transformator

Transformator pada prinsipnya tersusun atas dua kumparan berisolasi, yakni kumparan primer dan kumparan sekunder, yang berfungsi sebagai elemen utama untuk proses pemindahan energi. Pada konfigurasi umum, kedua kumparan tersebut dililitkan pada suatu inti magnetik berbahan besi, yang berperan sebagai media perambatan fluks. Ketika kumparan primer diberikan suplai arus bolak-balik (AC), akan timbul fluks magnetik variabel di sekelilingnya. Besarnya fluks tersebut sangat dipengaruhi oleh besar arus yang mengalir pada kumparan primer; semakin tinggi arus yang masuk, maka semakin besar pula kerapatan fluks magnet yang terbentuk. Perubahan fluks magnet secara kontinu ini kemudian menginduksi gaya gerak listrik (GGL) pada kumparan sekunder sehingga terjadi transfer daya dari primer menuju sekunder. Melalui mekanisme ini, transformator mampu melakukan penyesuaian tingkat tegangan, baik menaikkan maupun menurunkannya sesuai dengan kebutuhan sistem.

Sementara itu, inti besi pada transformator umumnya dibuat dari susunan lempengan besi tipis berisolasi yang dilaminasi dan disusun berlapis. Struktur berlaminasi tersebut dirancang untuk meminimalkan rugi-rugi akibat arus eddy serta menyediakan jalur perambatan fluks magnet yang lebih efisien. Selain itu, konfigurasi ini juga membantu menekan kenaikan temperatur pada inti sehingga transformator dapat beroperasi dengan stabil dan mempertahankan efisiensi kerjanya dalam jangka panjang[12].

2.5. Hubungan Pada Transformator 3 phase

Pada prinsipnya adalah metode atau cara merangkai kumparan di sisi primer dan sekunder. Umumnya dikenal 3 cara untuk merangkai kumparan pada transformator tiga fasa, yaitu hubungan bintang, hubungan delta, dan hubungan zig zag[13].

2.5.1. Transformator Hubungan Bintang (Y-Y)

Pada konfigurasi ini, setiap terminal fasa pada transformator dihubungkan dalam bentuk hubungan bintang, di mana seluruh titik netral disatukan dalam satu node. Skema hubungan tersebut sering diterapkan pada transformator tegangan tinggi karena dianggap lebih ekonomis untuk kapasitas arus nominal yang relatif kecil. Jumlah lilitan per fasa dan kebutuhan isolasinya menjadi lebih minimal sebab tegangan antar fasa yang bekerja merupakan tegangan saluran (*line voltage*), serta tidak terjadi pergeseran sudut fasa antara sisi primer dan sekunder.

Namun demikian, apabila beban pada sisi sekunder tidak seimbang, maka distribusi tegangan fasa pada sisi beban dapat mengalami ketidakaturan. Kondisi ini dapat diminimalkan apabila titik netral pada hubungan bintang dihubungkan ke sistem pembumian untuk menjaga kestabilan tegangan pada setiap fasa.

2.5.2. Transformator Hubung Segitiga Segitiga ($\Delta - \Delta$)

Pada konfigurasi ini, terminal fasa pada satu kumparan dihubungkan dengan terminal netral kumparan lainnya sehingga secara keseluruhan membentuk hubungan delta (Δ)/segitiga. Jenis sambungan ini umum diaplikasikan pada sistem dengan arus beban besar dan tegangan rendah, serta memiliki keunggulan dalam menjaga kelangsungan pelayanan meskipun terjadi gangguan atau kegagalan pada salah satu fasa, sehingga sistem masih dapat beroperasi dengan kapasitas yang terbatas.

2.5.3. Transformator Hubung Bintang Segitiga ($Y - \Delta$)

Pada konfigurasi sambungan ini, kumparan sisi primer disusun dalam bentuk bintang (Y), sedangkan kumparan sisi sekunder dirangkai dalam bentuk delta (Δ). Jenis hubungan ini umumnya diaplikasikan pada transformator sistem transmisi yang berfungsi untuk menurunkan tegangan (*step-down*) dari level tinggi ke level yang lebih rendah sesuai kebutuhan sistem distribusi.

Pada konfigurasi ini, rasio tegangan antar-jalur (*line-to-line voltage*) bernilai sebesar $1/\sqrt{3}$ dari rasio jumlah lilitan transformator, dan tegangan pada sisi sekunder mengalami pergeseran fasa sebesar 30° tertinggal terhadap tegangan sisi primer, sesuai karakteristik fasa dari hubungan bintang–segitiga tersebut.

2.5.4. Transformator Hubungan Segitiga Bintang ($\Delta - Y$)

Pada konfigurasi sambungan ini, kumparan sisi primer transformator dihubungkan dalam bentuk delta (Δ), sedangkan kumparan sisi sekundernya disusun dalam bentuk bintang (Y) sehingga terdapat titik netral pada sisi sekunder. Jenis hubungan ini umumnya digunakan pada tahap awal sistem transmisi tegangan tinggi untuk menaikkan tegangan (*step-up*) dari level rendah menuju level yang lebih tinggi.

Dalam konfigurasi ini, rasio tegangan antar-jalur (*line-to-line voltage*) bernilai $\sqrt{3}$ kali rasio jumlah lilitan antara kumparan primer dan sekunder, serta tegangan pada sisi sekunder mendahului tegangan sisi primer sebesar 30° , sesuai karakteristik hubungan delta–bintang pada sistem transformator daya.

2.5.5. Transformator Hubungan Zig - Zag

Kebanyakan transformator distribusi selalu dihubungkan bintang, salah satu syarat yang harus dipenuhi oleh transformator tersebut adalah ketiga fasanya harus diusahakan seimbang. Apabila beban tidak seimbang akan menyebabkan timbulnya tegangan titik bintang yang tidak diinginkan, karena tegangan pada peralatan yang digunakan pemakai akan berbeda-beda. Untuk menghindari terjadinya tegangan titik bintang, diantaranya adalah dengan menghubungkan sisi sekunder dalam hubungan Zig-zag.

Dalam hubungan zig zag sisi sekunder terdiri atas enam kumparan yang dihubungkan secara khusus. Ujung-ujung dari kumparan sekunder disambungkan

sedemikian rupa, supaya arah aliran arus didalam tiap-tiap kumparan menjadi bertentangan. Karena e1 tersambung secara berlawanan dengan gulungan e2.

2.6. Sistem Proteksi Transformator

Sistem proteksi pada transformator memiliki peranan yang sangat penting dalam menjaga kelangsungan operasi serta mencegah kerusakan peralatan akibat gangguan internal maupun eksternal. Proteksi ini umumnya direalisasikan melalui berbagai jenis *relay* proteksi, yang berfungsi untuk mendeteksi kondisi abnormal seperti kenaikan suhu, tekanan minyak berlebih, gangguan arus, maupun hubung tanah. Setiap *relay* memiliki karakteristik dan fungsi spesifik sesuai dengan titik pengawasannya pada transformator, baik pada tangki utama, konservator, maupun panel proteksi. Tabel 1 menunjukkan berbagai perangkat proteksi (*relay*) yang digunakan:

Tabel 1 Jenis-jenis relay yang ada pada transformator

No	Jenis Relay	Letak	Fungsi	Sinyal
1	Buchholz Relay	Antara tangki utama & konservator	Deteksi gas & aliran minyak abnormal	Alarm / Trip
2	Pressure Relief Relay	Atas tangki utama	Lepas tekanan berlebih	Trip
3	Oil Temperature Relay	Tangki trafo	Pantau suhu minyak	Alarm / Trip
4	Winding Temperature Relay	Terhubung ke CT	Pantau suhu lilitan	Alarm / Trip/ fan
5	Oil Level Relay	Konservator	Pantau level minyak	Alarm
6	Differential Relay (87T)	Panel proteksi	Gangguan internal	Trip
7	Overcurrent & Earth Fault Relay	Panel proteksi	Gangguan eksternal	Trip
8	Sudden Pressure Relay	Tangki utama	Tekanan gas mendadak	Trip
9	Restricted Earth Fault Relay	Panel proteksi	Hubung tanah internal	Trip
10	Explosion Vent /	Tangki utama	Pelepasan tekanan ekstrim	Trip

	Pressure Device			
--	-----------------	--	--	--

Berdasarkan tabel di atas, sistem proteksi transformator terdiri dari beberapa jenis relay seperti *Buchholz Relay*, *Differential Relay*, *Overcurrent Relay*, hingga *Pressure Relief Device*, yang secara bersamaan bekerja untuk memberikan sinyal alarm atau trip pada kondisi abnormal. Dengan penerapan sistem proteksi tersebut, transformator dapat beroperasi secara andal, efisien, serta memiliki umur pakai yang lebih panjang karena setiap potensi gangguan dapat terdeteksi sejak dini.

2.7. Efisiensi Transformator

Untuk mendapatkan nilai efisiensi transformator, maka perlu dilakukan analisis perhitungan daya semu, rugi-rugi tembaga, rugi-rugi inti sebagai berikut[14]:

2.7.1. Daya Semu

Daya semu (apparent power) adalah daya total hasil penjumlahan geometris dari daya aktif dan daya reaktif, diproduksi oleh perusahaan listrik untuk disalurkan ke konsumen. Secara matematis dapat dirumuskan dengan persamaan 1 dan 2 berikut:

$$S = V \times I \text{ (satu fasa)} \quad (1)$$

$$S = V \times I \times \sqrt{3} \text{ (tiga fasa)} \quad (2)$$

Dimana:

S = Daya semu (MVA)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

$\sqrt{3}$ = Konstanta sistem tiga fasa

2.7.2. Rugi-rugi Tembaga

Berat muatan pembebanan berkorelasi dengan kerugian kawat tembaga, sehingga losses pada kawat tembaga yang hilang akan meningkat seiring dengan bertambahnya muatan pada saat pembebanan. Secara matematis rugi-rugi tembaga dapat dirumuskan dengan persamaan 3 berikut:

$$P_{cu} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2 \times P_{cu FL} \quad (3)$$

Dimana:

P_{cu} = Rugi-rugi Tembaga (MW atau kW)

S_2 = Daya Semu (MVA)

S_1 = kapasitas Daya Semu Trafo (MVA)

$P_{cu\ FL}$ = Rugi-rugi tembaga pada beban penuh (*Full Load Copper Losses*) dari spesifikasi (MW atau kW)

2.7.3. Rugi-rugi Inti

Rugi inti disebabkan oleh rugi histeris dan arus eddy yang diukur melalui percobaan atau tes tanpa beban. Rugi histeris timbul karena adanya fluks bolak-balik pada inti besi yang disebabkan oleh pengaruh gelombang elektromagnetik yang membangkitkan arus di sisi sekunder juga ikut membangkitkan arus pada inti besi yang digunakan, sedangkan rugi eddy timbul karena pemanasan oleh arus yang terinduksi pada inti besi yang menyebabkan arus putar pada sisi yang lebih luas. Untuk menghitung rugi-rugi pada inti besi dapat menggunakan rumus persamaan 4 berikut:

$$P_i = P_c \quad (4)$$

Dimana:

P_i = rugi inti (watt)

P_c = Rugi tanpa beban (*no-load losses*) dari spesifikasi (MW atau kW)

Dalam penelitian ini rugi inti dianggap konstan karena tidak bergantung pada beban. Sehingga, rugi-rugi daya total transformator dapat diperoleh dari rumus persamaan 5 berikut:

$$P_{loss} = P_{cu} + P_c \quad (5)$$

Dimana:

P_{loss} = Total rugi-rugi daya trafo (MW atau kW)

P_{cu} = Rugi-rugi Tembaga (MW atau kW)

P_c = Rugi-rugi Inti (MW atau kW)

2.7.4. Efisiensi

Efisiensi transformator didefinisikan sebagai perbandingan antara energi keluaran yang bermanfaat dengan total energi masukan. Karena energi masukan pada transformator terdiri dari energi keluaran ditambah dengan seluruh rugi-rugi yang terjadi, maka efisiensi transformator dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan matematis. Secara umum, efisiensi transformator dapat dihitung berdasarkan pengukuran langsung energi masukan dan energi keluaran pada setiap kondisi pembebanan. Namun, dalam praktiknya, pengukuran tersebut sering kali sulit dilakukan, terutama pada transformator berkapasitas besar, akibat keterbatasan sarana pengujian. Oleh karena itu, efisiensi transformator juga dapat ditentukan dengan menghitung atau mengukur rugi-rugi transformator, kemudian menggunakan persamaan efisiensi yang melibatkan komponen rugi-rugi tersebut.

Adapun rumus efisiensi transformator dapat dinyatakan dari persamaan 6 berikut:

$$\eta = \frac{P_{keluaran}}{P_{masukan}} \times 100 \% \quad (6)$$

Karena daya masukan merupakan penjumlahan antara daya keluaran dan rugi-rugi, maka persamaan efisiensi juga dapat dituliskan seperti persamaan 7 berikut:

$$\eta = \frac{P_{keluaran}}{P_{keluaran} + P_{rugi-rugi\ total}} \times 100 \% \quad (7)$$

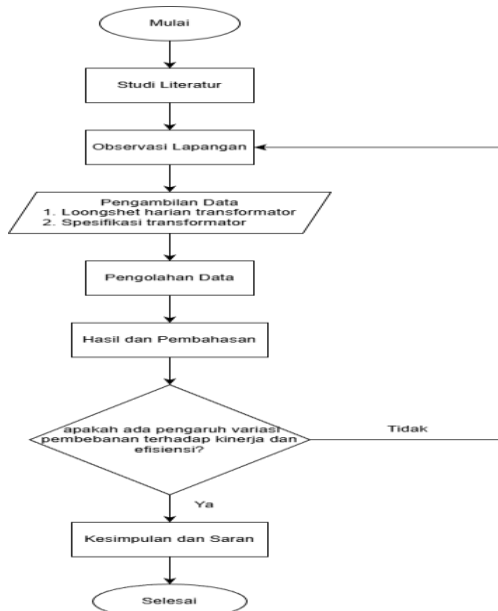
Dengan menggunakan persamaan tersebut, efisiensi transformator dapat ditentukan baik melalui pengukuran langsung daya masukan dan keluaran, maupun melalui perhitungan berdasarkan rugi-rugi transformator apabila pengukuran langsung tidak memungkinkan[4].

Bab 3. Metodologi Penelitian / Metode Pelaksanaan

3.1. Perancangan

Perancangan dalam penelitian ini menjelaskan tahapan-tahapan yang digunakan dalam penyusunan Tugas Akhir, yang disusun secara terstruktur untuk mendukung proses penyelesaian penelitian. Tahap awal dilakukan studi referensi yang berkaitan dengan transformator guna memperoleh data teknis dan landasan teori yang mendukung proses analisis. Selanjutnya, penelitian dilakukan melalui kegiatan pengumpulan serta identifikasi peralatan yang terdapat di PLTU Tanjung Kasam yang relevan sebagai objek kajian.

Pada tahap berikutnya, dilakukan analisis dan perhitungan terhadap parameter transformator, yang meliputi rugi-rugi daya transformator serta perhitungan efisiensi transformator. Setelah seluruh proses pengolahan dan analisis data selesai dilakukan, penelitian ini diakhiri dengan penyusunan kesimpulan dan saran yang disesuaikan dengan hasil penelitian yang telah diperoleh. Pada gambar 9 adalah sistem flowchart pada penelitian ini.



Gambar 9 Diagram Alir

3.2. Lokasi Penelitian

Berikut merupakan gambar 10 lokasi PT TJK POWER yang diambil menggunakan *google earth* oleh peneliti.



Gambar 10 Lokasi PLTU PT TJK POWER[15]

3.3. Observasi Lapangan

Observasi lapangan pada penelitian ini dilaksanakan melalui pengamatan secara langsung di lingkungan PT TJK Power terhadap objek yang menjadi fokus kajian. Kegiatan observasi meliputi peninjauan kondisi operasional peralatan, pengumpulan informasi melalui diskusi dan tanya jawab dengan staf operasional terkait, serta pelaksanaan inspeksi rutin secara mandiri sesuai dengan prosedur yang berlaku. Tahapan observasi ini bertujuan untuk memperoleh data dan informasi faktual yang akurat sebagai dasar dalam proses analisis dan pembahasan pada penelitian ini.

3.4. Metode Penelitian

Metode yang diterapkan dalam memperoleh data serta informasi pendukung pada penyusunan Tugas Akhir ini meliputi beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mendukung analisis penelitian dengan mengkaji berbagai referensi yang relevan. Bahan kajian diperoleh dari dokumentasi operasional seperti *logsheet* harian, data tren pembebanan yang ditampilkan pada monitor sistem, informasi teknis pada pelat nama mesin produksi, serta sumber referensi lain yang

berasal dari literatur ilmiah dan media daring yang berkaitan dengan topik penelitian.

2. Pengumpulan Data

Data penelitian diperoleh secara langsung dari lokasi penelitian. Sumber data meliputi pelat nama (*name plate*) peralatan, catatan operasi harian (*log sheet*), serta data trend pembebanan yang diperoleh dari sistem pemantauan di ruang *Central Control Room* (CCR).

3.5. Objek Penelitian



Gambar 11 Transformator di PT TJK POWER
(sumber:dokumentasi pribadi)

Dalam penelitian tugas akhir ini, transformator pada gambar 11 dijadikan sebagai objek penelitian untuk menganalisis kinerja operasional melalui nilai efisiensi perhitungan. Data operasional yang diperoleh dari transformator ini, seperti arus, tegangan, dan kondisi pembebanan, menjadi dasar dalam perhitungan rugi inti dan rugi tembaga serta evaluasi efisiensi secara kuantitatif. Dengan demikian, penelitian terhadap transformator ini diharapkan dapat memberikan gambaran nyata mengenai karakteristik kinerja transformator daya pada kondisi operasi aktual di lapangan.

3.6. Model Penelitian

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif yang menekankan pada pemanfaatan data numerik sebagai dasar analisis. Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian deskriptif kuantitatif, yang bertujuan untuk menggambarkan dan menjelaskan suatu fenomena secara sistematis, objektif, dan akurat berdasarkan data yang diperoleh. Penelitian ini difokuskan pada pengamatan pengaruh perubahan kinerja operasi terhadap besarnya rugi-rugi daya yang terjadi pada transformator Unit 1 di PLTU PT TJK Power.

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisis data, diperoleh bahwa nilai efisiensi transformator Unit 1 menunjukkan variasi pada setiap tanggal pengukuran. Variasi tersebut mencerminkan perubahan kondisi operasional sistem pembangkit selama periode pengamatan. Dalam penelitian ini, variabel penelitian didefinisikan sebagai faktor-faktor yang memiliki variasi tertentu dan telah ditetapkan oleh peneliti untuk dianalisis sehingga dapat ditarik kesimpulan yang relevan. Adapun variabel penelitian dikelompokkan sebagai berikut:

A. Variabel Terikat

1. Besarnya rugi-rugi daya pada transformator
2. Nilai efisiensi transformator

B. Variabel Bebas

1. Informasi operasional, yaitu parameter operasi yang ditampilkan pada layar monitor di ruang *Central Control Room*
2. Perubahan kapasitas beban, yaitu kondisi naik dan turunnya beban yang dihasilkan oleh generator sehingga menyebabkan perubahan tegangan dan arus pada transformator selama PLTU beroperasi. Data perubahan kapasitas beban diperoleh dari *Batam Control Center*.

Bab 4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Data Hasil Penelitian

4.1.1. Data Spesifikasi Transformator

Sebelum dilakukan analisis lebih lanjut terhadap kinerja dan efisiensi operasional transformator diperlukan penyajian data spesifikasi teknis sebagai dasar acuan. Tabel 2 spesifikasi transformator ini memuat parameter utama, seperti kapasitas daya, tegangan nominal, arus kerja, sistem pendinginan, serta kelas isolasi, yang berperan penting dalam menentukan kemampuan kerja, keandalan operasi, dan tingkat keselamatan peralatan. Dengan adanya data spesifikasi ini, evaluasi performa transformator dapat dilakukan secara lebih sistematis dan terukur.

Tabel 2 Spesifikasi teknis transformator

Type	SFZ 80000/150
Manufacturer	Karamay Oil Refinery
Serial Number of Ex-works	110658781
Product Code	1TBA. 710. 30426
Date of Manufacture	2011. 7
Standard Code	IEC60076-1 2000 IEC60076-2 1993 IEC60076-3 2000 IEC60076-5 2006
Number of Phase	3
Rated Power	80000/80000 kVA
Rated Frequency	50 Hz
Rated Voltage and Tepping Range	$(157.5 \pm 8 \times 11.25\%) / 10.5 \text{ kV}$
Vector Grup Symbol	Ynd11
Type of Cooling	ONAN/ONAF (70%/100%)
Operation Condition	outdoors
Noise Level	70 dB
Load Loss	273.73 kW
No-Load Loss	38.57 kW
No-Load Current	0.06 %
Impedance	12.64 %

4.1.2. Data Logsheets Transformator

Data logsheet transformator yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari PT TJK POWER dengan periode pengambilan data yang mencakup empat bulan pengamatan pada setiap jam 01:00 wib, yaitu mulai tanggal 1 September - 31 Desember 2025. Data ini dicatat secara rutin dan berkesinambungan untuk

merepresentasikan kondisi operasional transformator, sehingga dapat digunakan sebagai dasar analisis efisiensi dan kinerja transformator.

Tabel 3 Data Bulan September 2025

Tanggal	Load (MW)	P _{out} (MW)	Current (A)	Voltage (V)
1	61,6	56,14	228,3	156,000
2	60,1	57,00	228,4	156,000
3	61,3	56,45	229,1	156,000
4	49,8	44,22	168,7	157,000
5	41,2	36,71	140,6	156,000
6	40,5	36,62	135,5	157,000
7	40,0	36,58	134,3	157,000
8	40,3	36,58	139,1	156,000
9	50,4	46,83	179,2	154,000
10	55,8	51,54	203,8	153,000
11	60,3	56,50	233,9	151,000
12	59,4	50,16	225,4	152,000
13	50,8	46,39	182,8	152,000
14	56,1	52,10	215,7	151,000
15	56,4	52,29	217,2	150,000
16	55,3	52,62	207,9	150,000
17	47,2	42,73	195,3	151,000
18	45,9	41,48	187,1	151,000
19	50,6	47,58	180,8	151,000
20	51,0	47,46	192,7	152,000
21	45,5	41,80	184,1	153,000
22	46,8	42,08	181,5	153,000
23	45,0	41,84	177,9	153,000
24	46,9	41,70	176,7	153,000
25	50,0	42,63	183,3	154,000
26	45,7	42,14	171,4	154,000
27	46,0	42,74	170,5	154,000
28	45,9	42,21	170,8	155,000
29	46,0	42,19	173,2	155,000
30	45,4	42,02	172,3	155,000

Tabel 3 Tabel menyajikan data operasional harian *Main Transformator* Unit 1 PT. TJK POWER selama periode bulan September 2025. Data yang tercatat meliputi empat parameter utama, yaitu daya keluaran pembangkit (*Load*), daya aktif keluaran transformator (*Pout*), arus, serta tegangan pada sisi sekunder

transformator. Selama bulan September, pola pembebanan menunjukkan fluktuasi yang cukup signifikan dengan nilai beban terendah sebesar 40,0 MW dan beban tertinggi mencapai 61,6 MW. Variasi ini terjadi karena penyesuaian kapasitas produksi yang diatur oleh *Batam Centre Control* (BCC) berdasarkan kebutuhan daya konsumen setiap harinya.

Tabel 4 Data Bulan Oktober 2025

Tanggal	Load (MW)	P _{out} (MW)	Current (A)	Voltage (V)
1	50,6	46,96	192,7	153,000
2	50,8	46,67	193,2	153,000
3	44,8	41,27	175,3	153,000
4	44,7	41,27	177,1	153,000
5	45,2	41,44	174,8	153,000
6	41,0	37,22	162,3	153,000
7	41,1	37,42	163,9	154,000
8	45,3	41,55	182,7	152,000
9	50,7	46,83	206,1	151,000
10	55,5	51,37	217,3	150,000
11	56,0	51,36	219,2	152,000
12	50,0	46,12	192,3	153,000
13	45,0	41,26	173,5	153,000
14	55,4	51,73	215,5	152,000
15	55,6	51,51	215,7	152,000
16	50,8	47,07	203,4	153,000
17	50,4	46,28	195,3	153,000
18	45,5	41,99	179,4	153,000
19	50,4	46,21	191,5	153,000
20	50,3	46,37	191,6	153,000
21	50,2	46,33	189,6	153,000
22	50,4	46,30	188,8	153,000
23	50,2	46,40	188,4	154,000
24	50,2	46,50	187,4	154,000
25	49,6	46,23	179,2	154,000
26	46,7	41,88	172,3	154,000
27	45,6	41,66	168,2	154,000
28	45,2	41,35	161,3	155,000
29	40,0	36,89	151,7	154,000
30	40,8	36,92	152,2	154,000
31	40,4	36,86	153,1	154,000

Tabel 4 di atas menampilkan data operasional harian transformator selama bulan Oktober 2025 yang terdiri dari parameter beban pembangkit (*Load*), daya keluaran transformator (*P_{out}*), arus beban, dan tegangan sisi sekunder. Dibandingkan dengan bulan September, pola pembebanan pada Oktober cenderung lebih merata dan stabil, dengan rentang beban antara 40,0 MW hingga 56,0 MW. Kestabilan pola pembebanan ini berdampak pada konsistensi nilai arus dan tegangan yang lebih seragam, sehingga kondisi operasional transformator pada bulan ini relatif lebih terkendali dibandingkan bulan sebelumnya.

Tabel 5 Data Bulan November 2025

Tanggal	Load (MW)	P _{out} (MW)	Current (A)	Voltage (V)
1	45,0	41,53	157,2	154,000
2	40,1	34,10	141,1	154,000
3	40,0	33,96	140,8	155,000
4	39,9	34,24	140,9	154,000
5	40,3	33,79	141,7	155,000
6	40,3	34,44	141,8	155,000
7	40,7	34,42	142,4	154,000
8	45,3	38,89	185,5	152,000
9	50,1	44,60	184,3	152,000
10	45,5	38,94	186,1	151,000
11	48,4	40,92	191,2	151,000
12	49,7	43,02	189,4	152,000
13	49,8	42,68	189,6	152,000
14	50,2	43,54	200,6	150,000
15	49,8	43,51	196,7	150,000
16	49,5	43,08	192,2	152,000
17	49,8	43,54	192,1	152,000
18	50,2	43,21	191,0	152,000
19	50,0	43,44	192,4	152,000
20	50,2	43,31	190,5	152,000
21	49,5	43,38	185,3	153,000
22	49,7	43,01	186,2	153,000
23	49,9	43,64	183,7	153,000
24	50,1	43,91	182,7	153,000
25	49,6	43,46	182,8	153,000
26	50,1	43,37	182,9	154,000
27	50,1	43,87	182,6	153,000
28	50,3	44,00	182,7	154,000
29	50,2	43,59	182,3	154,000

30	45,6	39,21	167,5	154,000
----	------	-------	-------	---------

Tabel 5 di atas memperlihatkan data pengukuran operasional transformator selama bulan November 2025, yang mencakup nilai beban harian pembangkit, daya yang berhasil disalurkan melalui transformator (*P_{out}*), arus beban, serta tegangan keluaran sisi sekunder. Pada bulan ini, operasi transformator didominasi oleh rentang beban menengah antara 40 MW hingga 50 MW sesuai dengan instruksi dari BCC. Terdapat beberapa hari dengan selisih yang cukup mencolok antara nilai *Load* dan *P_{out}*, yang mengindikasikan adanya penyesuaian daya akibat kondisi operasional tertentu. Keseluruhan data pada tabel ini menjadi dasar dalam proses perhitungan rugi-rugi daya dan efisiensi transformator pada periode November 2025.

Tabel 6 Data Bulan Desember 2025

Tanggal	Load (MW)	P _{out} (MW)	Current (A)	Voltage (V)
1	40,0	33,68	130,7	156,000
2	40,8	34,25	132,2	156,000
3	40,3	34,27	130,6	156,000
4	40,1	34,08	130,8	157,000
5	37,4	30,64	117,4	157,000
6	35,1	29,46	111,7	157,000
7	35,4	29,78	112,3	157,000
8	45,0	38,58	150,2	155,000
9	45,1	42,40	159,2	155,000
10	50,3	43,96	172,1	155,000
11	50,6	43,67	174,5	155,000
12	45,2	38,63	157,9	155,000
13	45,3	38,67	154,5	155,000
14	54,3	49,24	192,6	154,000
15	54,0	48,73	189,4	154,000
16	50,8	44,50	178,3	154,000
17	50,0	43,68	175,3	155,000
18	50,5	43,94	172,2	155,000
19	50,3	43,97	171,7	155,000
20	51,5	44,83	175,8	155,000
21	50,6	44,42	173,5	155,000
22	50,5	44,03	169,4	154,000
23	50,1	41,10	168,3	155,000
24	44,7	39,43	151,3	155,000
25	40,1	34,16	133,1	156,000

26	40,8	33,58	136,2	156,000
27	40,3	33,88	135,9	156,000
28	40,3	34,40	133,9	156,000
29	40,4	34,46	134,2	156,000
30	40,4	34,29	133,1	156,000
31	36,8	30,88	120,8	156,000

Tabel di atas merangkum data operasional harian transformator pada bulan Desember 2025, yang sekaligus menjadi periode penutup dalam rentang penelitian ini. Kolom data yang tersaji mencakup beban pembangkit (*Load*), daya keluaran transformator (*P_{out}*), arus, dan tegangan. Pada bulan ini, variasi beban tercatat cukup beragam dengan nilai terendah 35,1 MW dan tertinggi 54,3 MW, di mana beberapa hari menunjukkan penurunan beban yang cukup tajam. Pola perubahan beban tersebut mengindikasikan adanya pergeseran permintaan daya dari sisi BCC menjelang akhir tahun, yang turut memengaruhi karakteristik arus dan tegangan transformator selama periode operasi berlangsung.

4.1.3. Perhitungan Efisiensi Transformator

Untuk mendapatkan nilai efisiensi transformator, maka perlu dilakukan analisis perhitungan daya semu, rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi inti. Untuk memperoleh nilai efisiensi transformator, maka perlu dilakukan perhitungan dengan mengacu pada tabel 3 - 6 dan persamaan 14 - 19. Berikut perhitungan pada tanggal 1 September 2025 sebagai berikut:

Diketahui :

$$P_{out} = 56,14 \text{ MW}$$

$$I = 228,3 \text{ A}$$

$$V = 156,000 \text{ V}$$

$$S_1 = 80 \text{ MVA}$$

$$P_c = 0,03857 \text{ MW}$$

$$P_{cuFL} = 0,27373 \text{ MW}$$

Penyelesaian :

a. Daya Semu

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

$$= 156,000 \text{ V} \times 228,3 \text{ A} \times \sqrt{3}$$

$$= 61.686,6431 \text{ VA}$$

$$= 61,68 \text{ MVA}$$

(2)

b. Rugi-rugi Tembaga

$$P_{cu} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2 \times P_{cuFL}$$

(3)

$$= \left(\frac{61,68 \text{ MVA}}{80 \text{ MVA}} \right)^2 \times 0,27373 \text{ MW}$$

$$= 0,42209166 \text{ MW}$$

c. Rugi-rugi Inti

$$P_i = P_c$$

$$P_c = 0,03857 \text{ MW}$$

(4)

d. Rugi-rugi Total

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{cu}} + P_c$$

$$= 0,42209166 \text{ MW} + 0,03857 \text{ MW}$$

$$= 0,46066166 \text{ MW}$$

(5)

e. Efisiensi

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + \text{Rugi-rugi Total}} \times 100 \%$$

$$= \frac{56,14}{56,14 + 0,46066166} \times 100 \%$$

(7)

$$= 99,1861196 \%$$

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai daya semu, rugi inti, rugi tembaga, rugi total, serta efisiensi transformator sebagai parameter utama dalam mengevaluasi kinerja dan tingkat keandalan operasi transformator. Hasil perhitungan tersebut selanjutnya disajikan dalam bentuk tabel untuk memudahkan analisis terhadap kondisi operasional transformator berdasarkan perhitungan serta pengaruh variasi pembebanan terhadap efisiensi transformator pada penelitian ini.

Tabel 7 Total rugi-rugi dan efisiensi pada transformator bulan September

Tanggal	Load (MW)	Daya Semu (MVA)	Rugi Tembaga (MW)	Rugi Inti (MW)	Rugi Total (MW)	Efisiensi (%)
1	61,6	61,68	0,42	0,03857	0,46	99,18
2	60,1	61,71	0,42	0,03857	0,46	99,19
3	61,3	61,90	0,42	0,03857	0,46	99,18
4	49,8	45,87	0,31	0,03857	0,35	99,20
5	41,2	37,99	0,25	0,03857	0,29	99,19
6	40,5	36,79	0,25	0,03857	0,29	99,21
7	40,0	36,52	0,24	0,03857	0,28	99,21
8	40,3	37,58	0,25	0,03857	0,29	99,19
9	50,4	47,79	0,32	0,03857	0,36	99,22
10	55,8	54,00	0,36	0,03857	0,40	99,21

11	60,3	61,17	0,41	0,03857	0,45	99,19
12	59,4	59,34	0,40	0,03857	0,44	99,12
13	50,8	48,12	0,32	0,03857	0,36	99,21
14	56,1	56,41	0,38	0,03857	0,42	99,19
15	56,4	55,43	0,38	0,03857	0,42	99,19
16	55,3	54,01	0,36	0,03857	0,40	99,23
17	47,2	51,07	0,34	0,03857	0,38	99,10
18	45,9	48,93	0,33	0,03857	0,37	99,10
19	50,6	47,28	0,32	0,03857	0,36	99,24
20	51,0	50,73	0,34	0,03857	0,38	99,19
21	45,5	48,78	0,33	0,03857	0,37	99,11
22	46,8	48,09	0,32	0,03857	0,36	99,13
23	45,0	47,14	0,32	0,03857	0,36	99,14
24	46,9	46,82	0,32	0,03857	0,35	99,14
25	50,0	48,89	0,33	0,03857	0,37	99,13
26	45,7	45,71	0,31	0,03857	0,35	99,17
27	46,0	45,47	0,31	0,03857	0,34	99,18
28	45,9	45,85	0,31	0,03857	0,35	99,17
29	46,0	46,47	0,31	0,03857	0,35	99,16
30	45,4	46,25	0,31	0,03857	0,35	99,16
Rata-rata	49,91	49,79	0,33	0,04	0,37	99,17

Berdasarkan Tabel 7 di atas, hasil perhitungan menunjukkan bahwa rugi-rugi total transformator pada bulan September berada pada rentang 0,28 MW hingga 0,46 MW dengan nilai efisiensi berkisar antara 99,10% hingga 99,24%. Rugi-rugi inti bersifat konstan sebesar 0,03857 MW pada seluruh data, sementara rugi-rugi tembaga bervariasi mengikuti perubahan beban yang terjadi setiap harinya.

Tabel 8 Total rugi-rugi dan efisiensi pada transformator bulan Oktober

Tanggal	Load (MW)	Daya Semu (MVA)	Rugi Tembaga (MW)	Rugi Inti (MW)	Rugi Total (MW)	Efisiensi (%)
1	50,6	51,06	0,34	0,03857	0,38	99,18
2	50,8	51,19	0,35	0,03857	0,38	99,17
3	44,8	46,45	0,31	0,03857	0,35	99,14
4	44,7	46,93	0,32	0,03857	0,35	99,13
5	45,2	46,32	0,31	0,03857	0,35	99,14
6	41,0	43,01	0,29	0,03857	0,33	99,11
7	41,1	43,71	0,29	0,03857	0,33	99,10
8	45,3	48,09	0,32	0,03857	0,36	99,12

9	50,7	53,90	0,36	0,03857	0,40	99,13
10	55,5	56,45	0,38	0,03857	0,42	99,17
11	56,0	57,70	0,39	0,03857	0,43	99,16
12	50,0	50,96	0,34	0,03857	0,38	99,16
13	45,0	45,97	0,31	0,03857	0,35	99,15
14	55,4	56,72	0,38	0,03857	0,42	99,18
15	55,6	56,78	0,38	0,03857	0,42	99,17
16	50,8	53,90	0,36	0,03857	0,40	99,14
17	50,4	51,75	0,35	0,03857	0,39	99,15
18	45,5	47,54	0,32	0,03857	0,36	99,14
19	50,4	50,74	0,34	0,03857	0,38	99,17
20	50,3	50,77	0,34	0,03857	0,38	99,17
21	50,2	50,24	0,34	0,03857	0,38	99,18
22	50,4	50,03	0,34	0,03857	0,38	99,18
23	50,2	50,25	0,34	0,03857	0,38	99,18
24	50,2	49,98	0,34	0,03857	0,38	99,18
25	49,6	47,79	0,32	0,03857	0,36	99,21
26	46,7	45,95	0,31	0,03857	0,35	99,16
27	45,6	44,86	0,30	0,03857	0,34	99,17
28	45,2	43,30	0,29	0,03857	0,33	99,19
29	40,0	40,46	0,27	0,03857	0,31	99,15
30	40,8	40,59	0,27	0,03857	0,31	99,15
31	40,4	40,83	0,27	0,03857	0,31	99,14
Rata-rata	48,01	48,85	0,33	0,04	0,37	99,16

Berdasarkan Tabel 8 di atas, hasil perhitungan menunjukkan bahwa rugi-rugi total transformator pada bulan Oktober berada pada rentang 0,31 MW hingga 0,43 MW dengan nilai efisiensi berkisar antara 99,10% hingga 99,21%. Rugi-rugi inti bersifat konstan sebesar 0,03857 MW pada seluruh data, sementara rugi-rugi tembaga mengalami perubahan sesuai dengan variasi arus beban yang terjadi selama bulan Oktober.

Tabel 9 Total rugi-rugi dan efisiensi pada transformator bulan November

Tanggal	Load (MW)	Daya Semu (MVA)	Rugi Tembaga (MW)	Rugi Inti (MW)	Rugi Total (MW)	Efisiensi (%)
1	45,0	41,93	0,28	0,03857	0,32	99,22
2	40,1	37,63	0,25	0,03857	0,29	99,13
3	40,0	37,80	0,25	0,03857	0,29	99,13

4	39,9	37,58	0,25	0,03857	0,29	99,14
5	40,3	38,04	0,26	0,03857	0,29	99,12
6	40,3	38,06	0,26	0,03857	0,29	99,13
7	40,7	37,98	0,25	0,03857	0,29	99,14
8	45,3	48,83	0,33	0,03857	0,37	99,05
9	50,1	48,52	0,33	0,03857	0,37	99,17
10	45,5	48,67	0,33	0,03857	0,37	99,05
11	48,4	50,00	0,34	0,03857	0,38	99,07
12	49,7	49,86	0,34	0,03857	0,37	99,12
13	49,8	49,91	0,34	0,03857	0,38	99,11
14	50,2	52,11	0,35	0,03857	0,39	99,10
15	49,8	51,10	0,34	0,03857	0,38	99,11
16	49,5	50,60	0,34	0,03857	0,38	99,11
17	49,8	50,57	0,34	0,03857	0,38	99,12
18	50,2	50,28	0,34	0,03857	0,38	99,12
19	50,0	50,65	0,34	0,03857	0,38	99,12
20	50,2	50,15	0,34	0,03857	0,38	99,12
21	49,5	49,10	0,33	0,03857	0,37	99,14
22	49,7	49,34	0,33	0,03857	0,37	99,13
23	49,9	48,68	0,33	0,03857	0,37	99,15
24	50,1	48,41	0,33	0,03857	0,36	99,16
25	49,6	48,44	0,33	0,03857	0,37	99,15
26	50,1	48,78	0,33	0,03857	0,37	99,14
27	50,1	48,38	0,33	0,03857	0,36	99,16
28	50,3	48,73	0,33	0,03857	0,37	99,16
29	50,2	48,62	0,33	0,03857	0,37	99,15
30	45,6	44,67	0,30	0,03857	0,34	99,12
Rata-rata	47,33	46,78	0,32	0,04	0,35	99,13

Berdasarkan Tabel 9 di atas, hasil perhitungan menunjukkan bahwa rugi-rugi total transformator pada bulan November berada pada rentang 0,29 MW hingga 0,39 MW dengan nilai efisiensi berkisar antara 99,05% hingga 99,22%. Rugi-rugi inti bersifat konstan sebesar 0,03857 MW pada seluruh data, sementara rugi-rugi tembaga berfluktuasi mengikuti perubahan beban yang terjadi selama bulan November.

Tabel 10 Total rugi-rugi dan efisiensi pada transformator bulan Desember

Tanggal	Load (MW)	Daya Semu	Rugi Tembaga	Rugi Inti (MW)	Rugi Total	Efisiensi (%)
---------	-----------	-----------	--------------	----------------	------------	---------------

		(MVA)	(MW)		(MW)	
1	40,0	35,31	0,24	0,03857	0,28	99,17
2	40,8	35,72	0,24	0,03857	0,28	99,18
3	40,3	35,28	0,24	0,03857	0,28	99,18
4	40,1	35,56	0,24	0,03857	0,28	99,17
5	37,4	31,92	0,21	0,03857	0,25	99,16
6	35,1	30,37	0,20	0,03857	0,24	99,17
7	35,4	30,35	0,20	0,03857	0,24	99,17
8	45,0	40,32	0,27	0,03857	0,31	99,19
9	45,1	42,74	0,29	0,03857	0,33	99,22
10	50,3	46,20	0,31	0,03857	0,35	99,19
11	50,6	46,84	0,32	0,03857	0,35	99,18
12	45,2	42,39	0,29	0,03857	0,32	99,15
13	45,3	42,47	0,28	0,03857	0,32	99,17
14	54,3	51,37	0,35	0,03857	0,39	99,21
15	54,0	50,51	0,34	0,03857	0,38	99,21
16	50,8	47,55	0,32	0,03857	0,36	99,19
17	50,0	47,06	0,32	0,03857	0,36	99,18
18	50,5	46,23	0,31	0,03857	0,35	99,19
19	50,3	46,09	0,31	0,03857	0,35	99,20
20	51,5	47,19	0,32	0,03857	0,36	99,20
21	50,6	46,57	0,31	0,03857	0,35	99,20
22	50,5	45,18	0,30	0,03857	0,34	99,21
23	50,1	44,89	0,30	0,03857	0,34	99,16
24	44,7	40,61	0,27	0,03857	0,31	99,20
25	40,1	35,96	0,24	0,03857	0,28	99,17
26	40,8	36,80	0,25	0,03857	0,29	99,14
27	40,3	36,72	0,25	0,03857	0,28	99,15
28	40,3	36,17	0,24	0,03857	0,28	99,17
29	40,4	36,26	0,24	0,03857	0,28	99, 17
30	40,4	36,96	0,24	0,03857	0,28	99,17
31	36,8	32,64	0,22	0,03857	0,26	99,15
Rata-rata	44,74	40,65	0,27	0,04	0,31	99,18

Berdasarkan Tabel 10 di atas, hasil perhitungan menunjukkan bahwa rugi-rugi total transformator pada bulan Desember berada pada rentang 0,24 MW hingga 0,39 MW dengan nilai efisiensi berkisar antara 99,14% hingga 99,22%, yang merupakan rentang rugi-rugi paling rendah dibandingkan tiga bulan sebelumnya. Rugi-rugi inti bersifat konstan sebesar 0,03857 MW pada seluruh data, sementara

rugi-rugi tembaga bervariasi sesuai dengan perubahan arus beban yang terjadi selama bulan Desember.

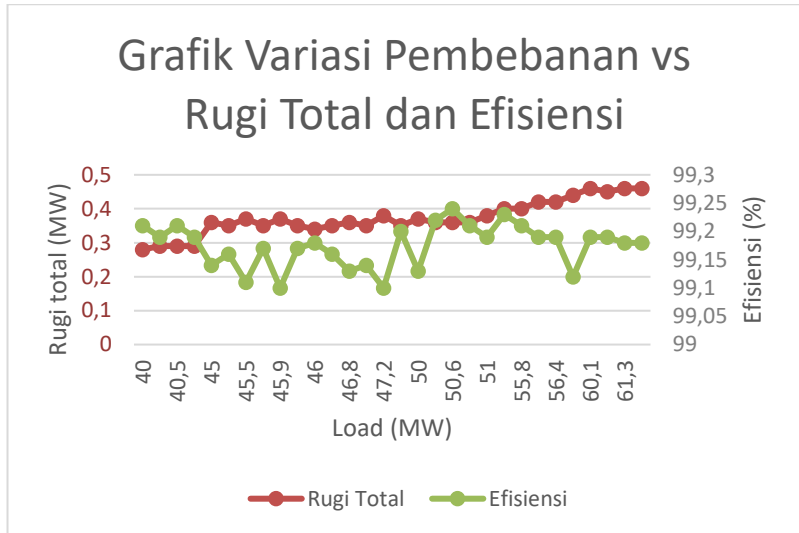
Tabel 11 Rekapitulasi Rata-rata perbulan

Bulan	Rata-rata					
	Load (MW)	Daya Semu (MVA)	Rugi Tembaga (MW)	Rugi Inti (MW)	Rugi Total (MW)	Efisiensi (%)
September	49,91	49,79	0,33	0,04	0,37	99,17
Oktober	48,01	48,85	0,33	0,04	0,37	99,16
November	47,33	46,78	0,32	0,04	0,35	99,13
Desember	44,74	40,65	0,27	0,04	0,31	99,18

Tabel 11 di atas menyajikan rekapitulasi nilai rata-rata bulanan hasil perhitungan dari Tabel 7 hingga Tabel 10, yang mencakup parameter rata-rata *Load* (MW), Daya Semu (MVA), Rugi Tembaga (MW), Rugi Inti (MW), Rugi Total (MW), dan Efisiensi (%) untuk masing-masing bulan selama periode September hingga Desember 2025. Berdasarkan tabel tersebut, terlihat bahwa rata-rata beban bulanan mengalami penurunan secara bertahap dari 49,91 MW pada bulan September hingga 44,74 MW pada bulan Desember, diikuti dengan perubahan nilai rugi total dan efisiensi yang bervariasi di setiap bulannya. Analisis lebih lanjut mengenai hubungan antara rata-rata beban dan efisiensi transformator pada keempat bulan tersebut akan dibahas secara lebih mendalam melalui grafik 20.

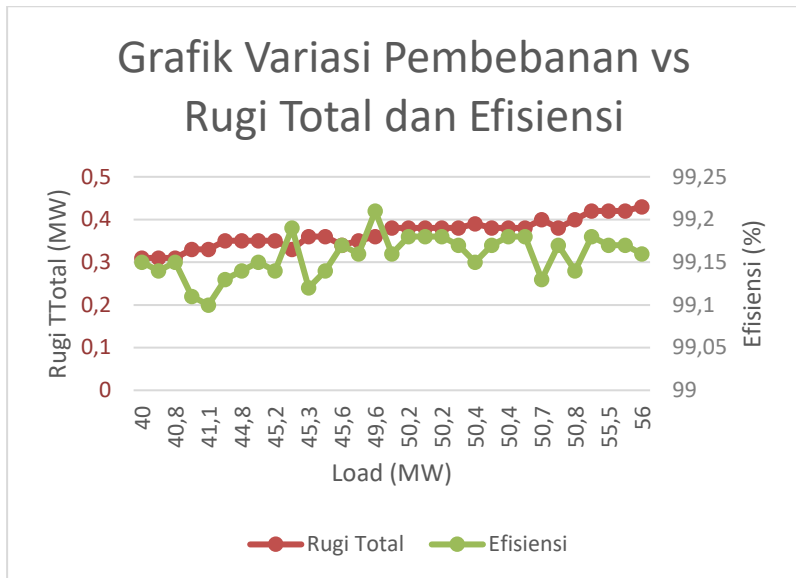
4.1.4. Analisis Grafik Variasi Pembebanan vs Total Rugi-Rugi dan Efisiensi

Berdasarkan hasil perhitungan bulan September-Desember tahun 2025 pada Tabel 7 - 10, maka dapat digambarkan grafik pembebanan terhadap total rugi-rugi dan efisiensi sebagai berikut:



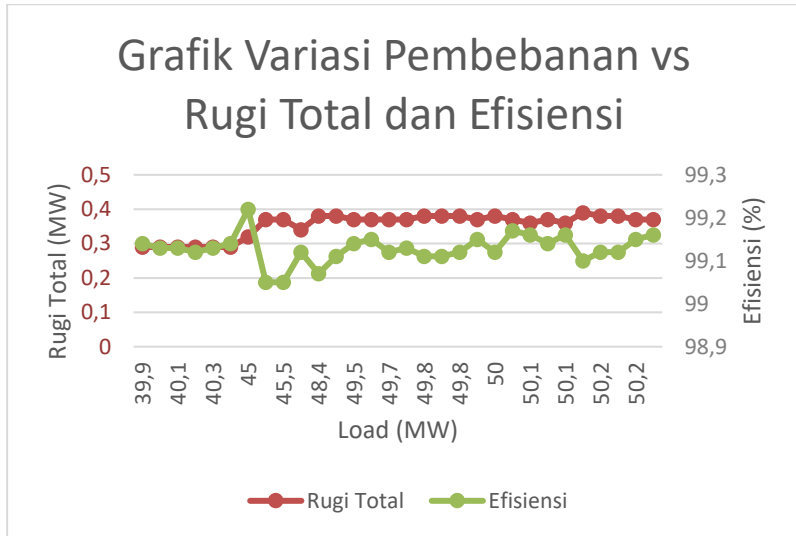
Gambar 12 Grafik Pembebanan terhadap Total Rugi-Rugi Dan Efisiensi pada bulan September 2025

Pada bulan September, sistem beroperasi dalam rentang beban yang paling lebar sepanjang periode penelitian, yakni dari 40,0 MW hingga 61,6 MW. Pada grafik terlihat bahwa saat pembebanan mencapai puncaknya di 61,6 MW, rugi-rugi total berada pada nilai tertinggi yaitu 0,46 MW. Hal ini terjadi karena kenaikan rugi-rugi tembaga yang berbanding lurus terhadap kuadrat arus beban. Sebaliknya, ketika beban turun ke kisaran 40,0 MW, rugi-rugi total mencapai nilai terendah 0,28 MW. Rugi-rugi inti tetap konstan di 0,03857 MW di seluruh titik data, sehingga perubahan total rugi-rugi sepenuhnya ditentukan oleh perubahan rugi-rugi tembaga. Terkait efisiensi, nilainya bergerak pada rentang 99,10% hingga 99,24%. Menariknya, muncul anomali pada beban di kisaran 47,2 MW dan 45,9 MW di mana efisiensi justru turun ke 99,10% meskipun nilai bebannya tidak yang tertinggi. Kondisi ini mengindikasikan adanya perubahan faktor daya atau kestabilan sistem yang tidak optimal pada hari-hari tersebut.



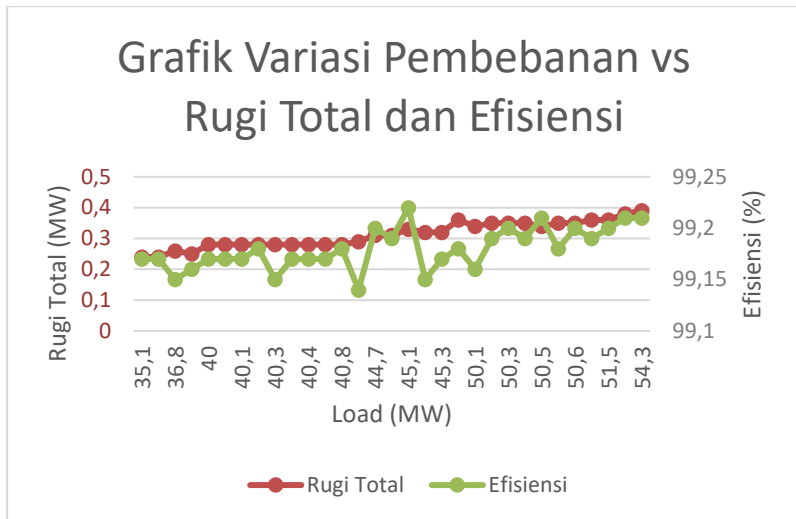
Gambar 13 Grafik Pembebanan terhadap Total Rugi-Rugi Dan efisiensi pada bulan Oktober 2025

Memasuki bulan Oktober, rentang beban menjadi lebih sempit, yaitu dari 40,0 MW hingga 56,0 MW. Berdasarkan grafik, rugi-rugi total berada pada rentang 0,31 MW hingga 0,43 MW, dengan pola peningkatan yang konsisten seiring bertambahnya pembebanan. Kondisi ini sesuai dengan teori transformator di mana kenaikan pembebanan akan meningkatkan arus beban sehingga rugi-rugi tembaga yang bersifat proporsional terhadap kuadrat arus juga meningkat. Efisiensi pada bulan Oktober bergerak antara 99,10% hingga 99,21%, dengan puncak efisiensi tertinggi terjadi di sekitar beban 49,6 MW yang mencapai 99,21%. Anomali terlihat pada beban rendah sekitar 41,1 MW di mana efisiensi turun ke nilai terendah 99,10% sebuah penyimpangan yang menunjukkan bahwa penurunan beban tidak selalu diikuti peningkatan efisiensi apabila faktor daya dan kestabilan sistem tidak dalam kondisi optimal.



Gambar 14 Grafik Pembebanan terhadap Total Rugi-Rugi Dan Efisiensi pada bulan November 2025

Bulan November menampilkan karakteristik operasional yang paling ekstrem di antara keempat bulan yang diteliti. Nilai rugi-rugi total berada pada rentang 0,29 MW hingga 0,39 MW lebih sempit dari bulan sebelumnya, namun disertai anomali paling signifikan. Pada beban 45,3 MW dan beban 45,5 MW, grafik menunjukkan lonjakan rugi-rugi tidak wajar disertai penurunan efisiensi ke nilai terendah sepanjang periode penelitian, yaitu 99,05%. Padahal secara teori, beban pada kisaran tersebut seharusnya menghasilkan efisiensi yang lebih baik, sebagaimana yang terjadi pada beban 45,0 MW yang justru mencatatkan efisiensi tertinggi dalam bulan ini sebesar 99,22%. Kejadian ini menunjukkan bahwa efisiensi transformator tidak hanya dipengaruhi oleh besar kecilnya rugi-rugi total, tetapi juga dipengaruhi oleh besarnya daya keluaran aktual, faktor daya, tegangan operasi, serta kestabilan sistem pembangkit pada saat pengambilan data. Anomali ini yang menarik rata-rata efisiensi bulan November ke nilai terendah, yaitu 99,13%.

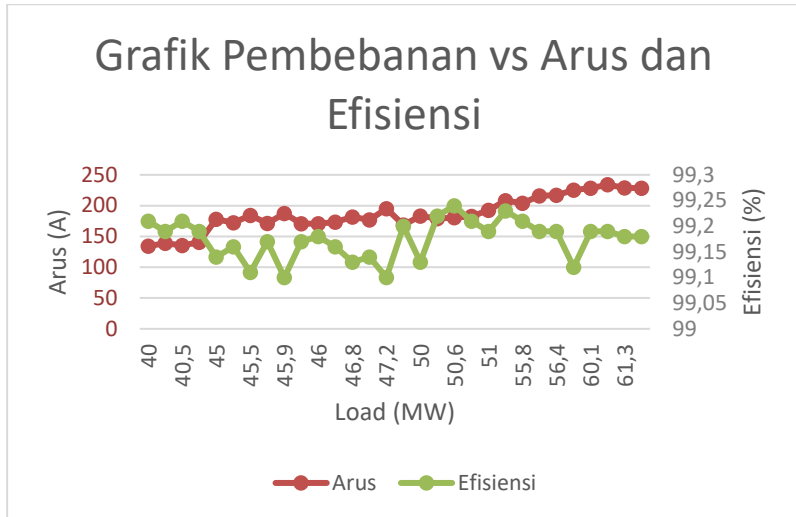


Gambar 15 Grafik Pembebanan terhadap Total Rugi-Rugi Dan Efisiensi pada bulan Desember 2025

Bulan Desember menunjukkan kondisi operasional yang paling ringan dan paling stabil sepanjang periode penelitian, dengan rata-rata beban terendah 44,74 MW. Pada grafik terlihat bahwa nilai rugi-rugi total berada pada rentang 0,24 MW hingga 0,39 MW rentang rugi-rugi paling rendah dibandingkan tiga bulan sebelumnya. Nilai rugi-rugi total tertinggi terjadi pada saat pembebanan berada pada 50 MW hingga 54,3 MW, namun peningkatan tersebut masih dalam batas operasional yang normal dan tidak menunjukkan adanya indikasi pembebanan berlebih. Efisiensi pada bulan Desember bergerak pada rentang 99,14% hingga 99,22%, dengan pola yang lebih stabil dan terkendali, serta rata-rata efisiensi tertinggi sepanjang periode penelitian yaitu 99,18%. Kondisi ini membuktikan bahwa pengurangan beban yang terkontrol dan stabil tanpa fluktuasi ekstrem menghasilkan keseimbangan yang lebih baik antara daya keluaran dan total rugi-rugi yang timbul.

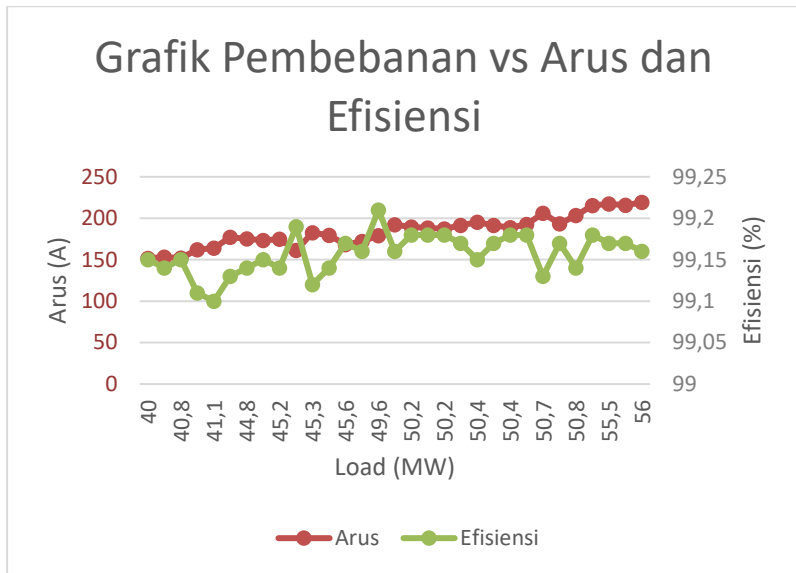
4.1.5. Analisis Grafik Pembebanan vs Arus dan Efisiensi

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 7 - 10, maka dapat digambarkan grafik Pembebanan terhadap arus dan efisiensi sebagai berikut:



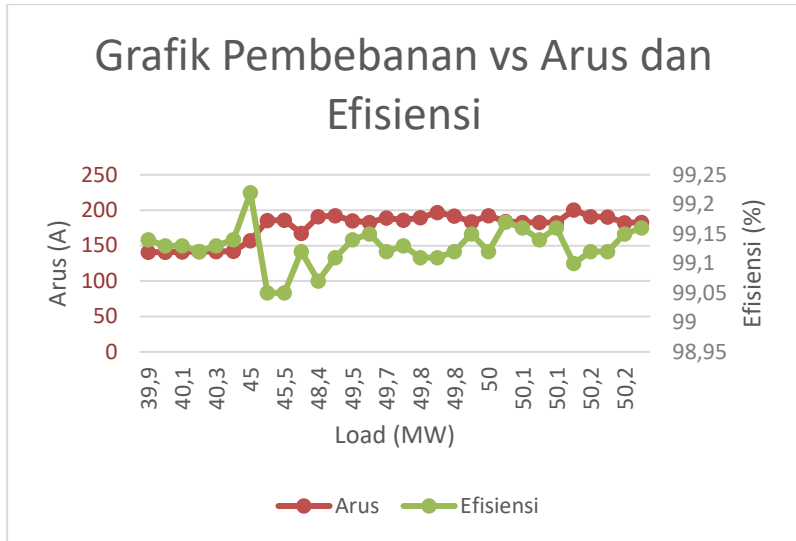
Gambar 16 Grafik Pembebanan terhadap Arus Dan Efisiensi pada bulan September 2025

Arus pada bulan September menunjukkan fluktuasi yang paling besar dibandingkan bulan lainnya, dengan nilai tertinggi mencapai 233,9 A pada beban 60,3 MW dan terendah berada di angka 134,3 A pada beban 40 MW. Pada grafik 16 terlihat jelas hubungan yang searah antara kenaikan beban dan kenaikan arus, yang sesuai dengan prinsip daya semu. Namun, yang menarik adalah munculnya anomali pada beban 47,2 MW dan 45,9 MW di mana arus tercatat cukup tinggi di kisaran 187–195 A, tetapi efisiensi justru turun ke 99,10%. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pada titik-titik beban tersebut terdapat ketidaksesuaian antara besaran arus dan daya keluaran aktual, yang bisa disebabkan oleh perubahan faktor daya atau ketidakseimbangan beban antar fasa akibat instruksi pembebanan dari Batam Centre Control (BCC) yang bersifat fluktuatif.



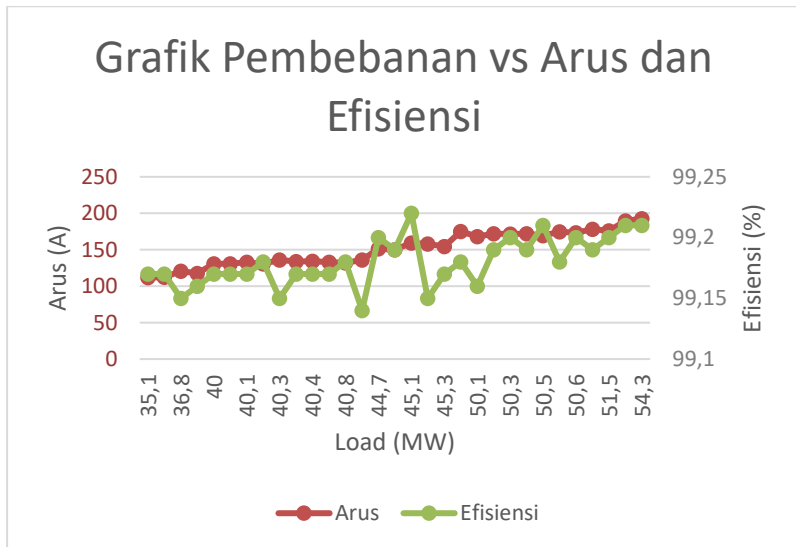
Gambar 17 Grafik Pembebanan terhadap Arus Dan Efisiensi pada bulan Oktober 2025

Arus pada bulan Oktober berada pada kisaran 151,7 A hingga 219,2 A, dengan pola kenaikan yang lebih teratur seiring meningkatnya beban. Grafik memperlihatkan bahwa efisiensi tertinggi 99,21% terjadi di sekitar beban 49,6 MW yang diikuti arus pada kisaran yang proporsional. Anomali penurunan tajam terjadi di sekitar beban 41,1 MW di mana arus turun drastis ke 163,9 A dan efisiensi ikut turun ke nilai terendah 99,10%. Meskipun terdapat anomali tersebut, stabilitas nilai efisiensi pada bulan Oktober secara keseluruhan mengindikasikan bahwa kenaikan rugi-rugi masih sebanding dengan peningkatan daya keluaran, sehingga performa transformator tidak mengalami penurunan yang signifikan.



Gambar 18 Grafik Pembebanan terhadap Arus Dan Efisiensi pada bulan November 2025

Grafik bulan November menampilkan anomali terbesar sepanjang periode penelitian. Pada beban 45,3 MW dan 45,5 MW, arus mengalami penurunan ke angka 140,8 A, namun bersamaan dengan itu efisiensi juga turun ke nilai terendah 99,05%. Kejanggalan ini sangat mencolok dalam grafik karena nilai arus yang rendah seharusnya berkorelasi dengan rugi-rugi tembaga yang kecil, sehingga efisiensi seharusnya lebih tinggi. Fenomena ini menunjukkan bahwa pada kondisi tersebut daya keluaran aktual yang tersalurkan juga mengalami penurunan yang tidak proporsional. Sebaliknya, pada beban 45,0 MW, arus tercatat di angka yang lebih tinggi dengan efisiensi mencapai 99,22%, menegaskan bahwa faktor daya dan kondisi kestabilan sistem pada hari pengambilan data sangat menentukan besaran efisiensi yang dihasilkan.

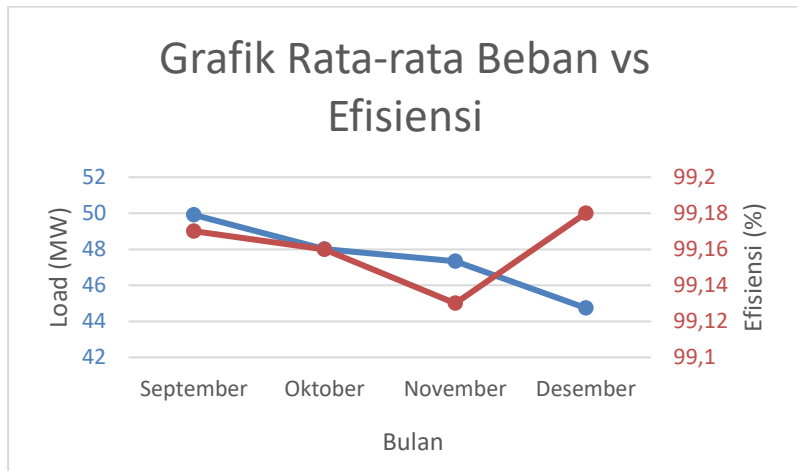


Gambar 19 Grafik Pembebanan terhadap Arus Dan Efisiensi pada bulan Desember 2025

Arus pada bulan Desember berada pada kisaran paling rendah sepanjang penelitian, yaitu antara 111,7 A hingga 192,6 A, dengan pola yang lebih terkendali dan stabil dibandingkan bulan-bulan sebelumnya. Grafik memperlihatkan bahwa kenaikan arus seiring kenaikan beban (saat beban mencapai 54,3 MW pada tanggal 14) tidak menimbulkan anomali yang signifikan, sehingga efisiensi tetap bergerak dalam rentang yang konsisten antara 99,14% hingga 99,22%. Kondisi ini mencerminkan bahwa pola pembebanan pada bulan Desember yang lebih ringan dan stabil memberikan kondisi operasional yang paling optimal bagi transformator, dengan keseimbangan terbaik antara arus beban, rugi-rugi tembaga, dan daya keluaran yang dihasilkan.

4.1.6. Analisis Grafik Rata-rata Beban vs Efisiensi

Berdasarkan hasil perhitungan Rata-rata bulan September-Desember tahun 2025 pada Tabel 11, maka dapat digambarkan grafik rata-rata beban vs efisiensi sebagai berikut:



Gambar 20 Grafik Rata-rata Beban vs Efisiensi 2025

Berdasarkan Gambar 20 di atas, terlihat bahwa hubungan antara rata-rata beban bulanan dan efisiensi transformator tidak bersifat linier secara sederhana, melainkan menunjukkan pola yang cukup menarik untuk dianalisis. Grafik ini menggambarkan posisi masing-masing bulan berdasarkan dua parameter sekaligus, yaitu rata-rata beban (*Load*) dalam satuan MW dan rata-rata efisiensi dalam satuan persen, sehingga dapat diidentifikasi secara langsung bulan mana yang beroperasi paling optimal dari sisi perbandingan beban terhadap efisiensi yang dihasilkan.

Pada bulan September, rata-rata beban tercatat sebesar 49,91 MW dengan rata-rata efisiensi sebesar 99,17%. Kondisi ini menempatkan September sebagai bulan dengan rata-rata beban tertinggi sepanjang periode penelitian. Tingginya rata-rata beban pada bulan ini menyebabkan arus beban yang mengalir pada kumparan transformator juga berada pada level tertinggi, sehingga rugi-rugi tembaga yang dihasilkan pun relatif lebih besar dibandingkan bulan lainnya. Meskipun demikian, efisiensi yang dihasilkan masih berada pada rentang yang sangat tinggi dan tidak menunjukkan adanya penurunan performa yang signifikan,

yang menandakan bahwa transformator masih mampu bekerja secara optimal meskipun menanggung beban rata-rata yang lebih besar.

Memasuki bulan Oktober, rata-rata beban mengalami penurunan menjadi 48,01 MW, diikuti dengan sedikit penurunan efisiensi rata-rata menjadi 99,16%. Pola ini menunjukkan bahwa meskipun beban rata-rata Oktober lebih rendah dibandingkan September, efisiensinya justru ikut turun. Kondisi ini mengindikasikan bahwa penurunan beban tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi, karena efisiensi transformator juga dipengaruhi oleh faktor daya, tegangan operasi, serta kestabilan sistem pembangkit pada saat pengambilan data, sebagaimana pola yang telah terlihat pula pada grafik-grafik bulan sebelumnya.

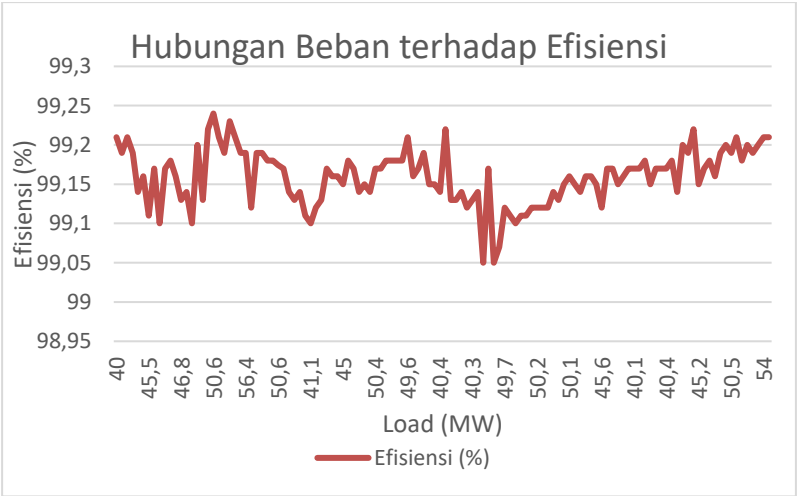
Pada bulan November, rata-rata beban kembali turun menjadi 47,33 MW dan efisiensi rata-rata mencatatkan nilai terendah sepanjang periode penelitian, yaitu sebesar 99,13%. Penurunan efisiensi pada bulan November ini sejalan dengan temuan pada Grafik 14 dan 18, di mana terdapat beberapa titik pembebanan yang mengalami anomali penurunan efisiensi secara tajam, terutama pada beban di kisaran 45,3 MW dan 45,5 MW yang mencatatkan efisiensi serendah 99,05%. Anomali tersebut menarik rata-rata efisiensi bulan November ke bawah secara signifikan, sehingga meskipun rata-rata beban November lebih rendah dari September dan Oktober, efisiensi rata-ratanya justru menjadi yang terendah di antara keempat bulan yang diamati.

Bulan Desember menunjukkan kondisi yang paling menarik dalam grafik ini. Dengan rata-rata beban terendah sepanjang periode penelitian yaitu 44,74 MW, bulan Desember justru mencatatkan rata-rata efisiensi tertinggi sebesar 99,18%. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi pembebanan yang lebih ringan dan tanpa adanya anomali yang signifikan seperti yang terjadi pada bulan November, transformator mampu beroperasi dengan tingkat efisiensi yang lebih optimal. Kondisi ini sesuai dengan teori operasi transformator, di mana pengurangan beban yang terkontrol dan stabil tanpa fluktuasi ekstrem akan menghasilkan keseimbangan yang lebih baik antara daya keluaran dan total rugi-rugi yang timbul, sehingga efisiensi yang dihasilkan pun lebih tinggi.

Secara keseluruhan, grafik rata-rata beban vs efisiensi ini memperlihatkan bahwa hubungan antara kedua parameter tersebut tidak selalu berbanding terbalik secara langsung. Penurunan beban rata-rata dari September ke November tidak diikuti oleh peningkatan efisiensi yang konsisten, karena faktor anomali dan fluktuasi operasional turut memberikan pengaruh yang nyata terhadap nilai efisiensi rata-rata setiap bulannya. Baru pada bulan Desember, ketika kondisi operasional lebih stabil dan beban rata-rata berada pada titik terendah, efisiensi rata-rata transformator mencapai nilai terbaiknya. Hal ini menegaskan bahwa kestabilan dan konsistensi kondisi pembebanan merupakan faktor yang sama pentingnya dengan besaran beban itu sendiri dalam menentukan tingkat efisiensi *Main Transformer* Unit 1 PLTU PT. TJK POWER.

4.1.7 Analisis Karakteristik Hubungan Beban terhadap Efisiensi Melalui Integrasi Data

Analisis pada bagian ini didasarkan pada hasil integrasi data operasional Main Transformator Unit 1 selama periode September hingga Desember 2025. Grafik 21 integrasi data yang disajikan menyusun variasi pembebanan mulai dari nilai terkecil sebesar 35,1 MW hingga nilai terbesar sebesar 61,6 MW untuk memetakan karakteristik efisiensi secara menyeluruh. Melalui visualisasi ini, terlihat jelas bahwa hubungan antara beban dan efisiensi tidak bersifat linier sederhana, di mana penurunan beban tidak selalu diikuti dengan peningkatan efisiensi secara konstan.



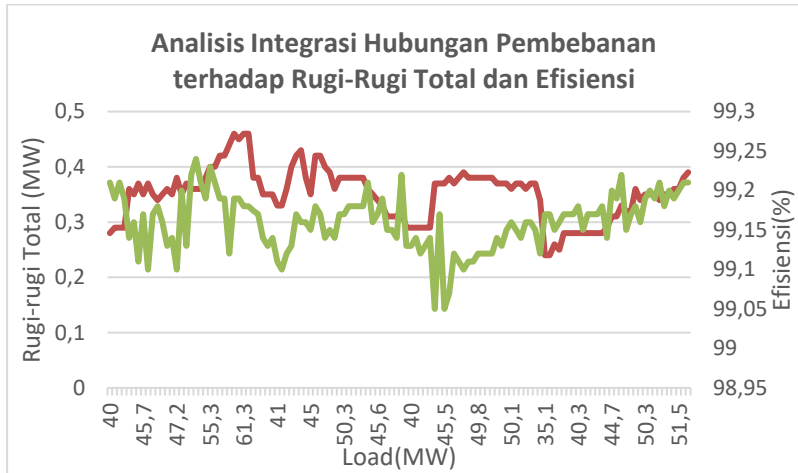
Gambar 21 Hubungan Beban terhadap Efisiensi September – Desember 2025

Grafik 21 menunjukkan bahwa efisiensi tertinggi secara konsisten tercapai pada titik beban 45 MW (99,22%) yang merupakan titik operasi paling optimal, sementara beban 50 MW menjadi titik operasi paling stabil. Selain itu, integrasi data ini mempermudah identifikasi anomali kritis pada rentang beban 45,3 MW hingga 45,5 MW, di mana efisiensi turun ke level terendah sebesar 99,05% akibat pengaruh fluktuasi faktor daya dan kestabilan sistem pada saat pengambilan data.

4.1.8. Analisis Integrasi Hubungan Pembebanan terhadap Rugi-Rugi Total dan Efisiensi

Analisis ini dilakukan dengan melakukan integrasi data untuk melihat korelasi antara besarnya variasi pembebanan terhadap rugi-rugi total dan efisiensi *Main Transformator* Unit 1. Grafik ini bertujuan untuk membuktikan secara visual

bagaimana peningkatan beban memengaruhi rugi-rugi tembaga, yang pada akhirnya menentukan nilai efisiensi operasional transformator selama periode pengamatan.



Gambar 22 Hubungan Pembebanan terhadap Rugi-Rugi Total dan Efisiensi Periode September - Desember 2025

Berdasarkan grafik 22 hasil integrasi data tersebut, terlihat bahwa kurva Rugi Total (Oranye) memiliki tren yang berbanding lurus dengan peningkatan beban; semakin tinggi beban, maka rugi-rugi total semakin meningkat akibat kenaikan rugi tembaga yang proporsional terhadap kuadrat arus. Sementara itu, kurva Efisiensi (Abu-abu) menunjukkan pola fluktuatif di mana titik efisiensi tertinggi (99,22%) tercapai saat rugi-rugi total berada pada titik keseimbangan optimal di beban 45 MW. Sebaliknya, terdapat penurunan efisiensi yang signifikan hingga 99,05% pada rentang beban 45,3 MW–45,5 MW, yang mengonfirmasi adanya anomali operasional di mana rugi-rugi total tidak sebanding dengan daya keluaran yang dihasilkan pada saat itu.

4.2. Pembahasan Analisis Penelitian

4.2.1. Analisis Data

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis grafik yang telah dibahas pada sub bab 4.1.4, 4.1.5, dan 4.1.6, secara keseluruhan dapat diidentifikasi bahwa variasi pembebanan memberikan pengaruh langsung terhadap besarnya rugi-rugi daya

serta nilai efisiensi *Main Transformator* Unit 1 PLTU PT. TJK POWER selama periode September hingga Desember 2025.

Pada bulan September, sistem beroperasi dalam rentang beban yang paling lebar sepanjang periode penelitian, yakni dari 40,0 MW hingga 61,6 MW, dengan rata-rata beban tertinggi sebesar 49,91 MW. Saat pembebanan meningkat mencapai 61,6 MW, rugi-rugi total transformator berada pada nilai tertinggi yaitu 0,46 MW, yang terjadi akibat kenaikan rugi-rugi tembaga yang berbanding lurus terhadap kuadrat arus beban. Arus pada bulan ini menunjukkan fluktuasi yang paling besar dibandingkan bulan lainnya, dengan nilai tertinggi mencapai 233,9 A pada beban 60,3 MW dan terendah berada di angka 134,3 A pada beban 40,0 MW. Nilai efisiensi bergerak pada rentang 99,10% hingga 99,24%, dengan penurunan yang cukup mencolok terjadi pada beban di kisaran 47,2 MW dan 45,9 MW yang menjadi titik anomali utama bulan ini. Anomali ini terjadi meskipun nilai beban pada titik tersebut bukan yang tertinggi, mengindikasikan adanya perubahan faktor daya atau ketidakseimbangan beban antar fasa yang memengaruhi efisiensi secara tidak proporsional. Meskipun demikian, nilai efisiensi tidak pernah turun di bawah 99,10% sepanjang bulan September, yang menandakan bahwa transformator masih bekerja dalam kondisi sangat baik dan efisien meskipun mengalami variasi pembebanan yang bersifat fluktuatif.

Memasuki bulan Oktober, rentang beban menjadi lebih sempit yaitu dari 40,0 MW hingga 56,0 MW, dengan rata-rata beban sebesar 48,01 MW yang sedikit lebih rendah dibandingkan September. Rugi-rugi total berada pada rentang 0,31 MW hingga 0,43 MW, dengan pola peningkatan yang konsisten seiring bertambahnya pembebanan. Kondisi ini sesuai dengan teori transformator, di mana kenaikan pembebanan akan meningkatkan arus beban sehingga rugi-rugi tembaga yang bersifat proporsional terhadap kuadrat arus juga meningkat. Arus berada pada kisaran 151,7 A hingga 219,2 A, dengan anomali penurunan tajam yang terjadi di sekitar beban 41,1 MW di mana arus turun drastis ke 163,9 A dan efisiensi ikut turun ke nilai terendah 99,10%. Efisiensi pada bulan Oktober bergerak antara 99,10% hingga 99,21%, dengan puncak efisiensi tertinggi terjadi di sekitar beban 49,6 MW yang mencapai 99,21%. Stabilitas nilai efisiensi tersebut mengindikasikan bahwa kenaikan rugi-rugi masih sebanding dengan peningkatan daya keluaran, sehingga performa transformator tidak mengalami penurunan yang signifikan.

Bulan November menampilkan karakteristik operasional yang paling ekstrem di antara keempat bulan yang diteliti. Nilai rugi-rugi total transformator berada pada rentang 0,29 MW hingga 0,39 MW, dengan rentang yang lebih sempit namun disertai anomali yang paling signifikan. Anomali terbesar terjadi pada beban di kisaran 45,3 MW dan 45,5 MW, di mana efisiensi turun ke nilai terendah sepanjang periode penelitian yaitu 99,05%, sementara arus juga mengalami penurunan ke angka 140,8 A. Kondisi ini sangat kontras dengan tanggal 1 November di mana beban 45,0 MW justru mencatatkan efisiensi tertinggi dalam penelitian ini yakni

99,22%, menjadikannya titik operasi paling optimal pada bulan tersebut. Perbedaan yang mencolok pada rentang beban yang hampir sama ini membuktikan bahwa efisiensi transformator tidak hanya dipengaruhi oleh besar kecilnya rugi-rugi total, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh besarnya daya keluaran aktual, faktor daya, tegangan operasi, serta kestabilan sistem pembangkit pada saat pengambilan data. Rata-rata beban November tercatat sebesar 47,33 MW dengan rata-rata efisiensi 99,13%, yang merupakan rata-rata efisiensi terendah sepanjang periode penelitian akibat pengaruh anomali yang terjadi pada pertengahan bulan.

Bulan Desember menunjukkan kondisi operasional yang paling ringan dan paling stabil sepanjang periode penelitian, dengan rata-rata beban terendah yaitu 44,74 MW. Nilai rugi-rugi total berada pada rentang 0,24 MW hingga 0,39 MW, yang merupakan rentang rugi-rugi paling rendah dibandingkan tiga bulan sebelumnya. Nilai rugi-rugi total tertinggi terjadi pada saat pembebanan berada pada 50 MW hingga 54,3 MW, namun peningkatan tersebut masih dalam batas operasional yang normal dan tidak menunjukkan adanya indikasi pembebanan berlebih. Arus berada pada kisaran 111,7 A hingga 192,6 A, dengan pola yang lebih terkendali dibandingkan bulan-bulan sebelumnya. Efisiensi bergerak pada rentang 99,14% hingga 99,22%, dengan rata-rata efisiensi tertinggi sepanjang periode penelitian yaitu 99,18%. Kondisi pembebanan yang lebih ringan dan stabil pada bulan Desember berkontribusi langsung terhadap capaian efisiensi rata-rata yang lebih optimal, mengindikasikan bahwa kestabilan kondisi pembebanan merupakan faktor yang sama pentingnya dengan besaran beban itu sendiri dalam menentukan tingkat efisiensi transformator.

4.2.2. Pembahasan Tren dan Pola Keseluruhan

Berdasarkan seluruh hasil analisis pada sub bab 4.1 yang telah dibahas melalui Tabel 7 hingga Tabel 11 serta Grafik 12 hingga Grafik 20, terdapat empat pola dan tren utama yang dapat diidentifikasi dari empat bulan periode penelitian ini.

Dari sisi rugi-rugi total, terlihat tren penurunan yang konsisten dari September hingga Desember. Rata-rata rugi total pada bulan September dan Oktober tercatat masing-masing sebesar 0,37 MW, kemudian turun menjadi 0,35 MW pada November, dan mencapai titik terendah 0,31 MW pada Desember. Penurunan ini sejalan dengan teori operasi transformator yang telah dibahas pada Bab 2, di mana peningkatan beban akan menaikkan arus yang mengalir pada kumparan transformator sehingga rugi-rugi tembaga meningkat. Karena rugi-rugi inti bersifat konstan sebesar 0,03857 MW pada seluruh data sebagaimana telah dijelaskan pada sub bab 2.7.3, maka perubahan rugi-rugi total dari bulan ke bulan sepenuhnya dipengaruhi oleh perubahan rugi-rugi tembaga akibat variasi beban operasional yang diatur oleh *Batam Centre Control* (BCC).

Dari sisi efisiensi, pola yang terbentuk tidak sepenuhnya berbanding terbalik secara linier terhadap penurunan beban. Efisiensi rata-rata mengalami sedikit

penurunan dari 99,17% pada September menjadi 99,16% pada Oktober, kemudian turun lebih jauh ke 99,13% pada November, sebelum akhirnya naik kembali ke nilai tertinggi 99,18% pada Desember. Rentang perbedaan efisiensi rata-rata antar bulan memang sangat kecil — hanya sekitar 0,05% antara nilai terendah (99,13% pada November) dan tertinggi (99,18% pada Desember) — namun pola non-linier yang terbentuk ini memiliki makna yang penting secara operasional.

Anomali penurunan efisiensi pada bulan November menjadi pengecualian dalam tren ini, yang disebabkan oleh perubahan beban secara tiba-tiba, ketidakseimbangan beban antar fasa, gangguan jaringan yang bersifat sementara, serta variasi faktor daya yang tidak terkompensasi secara optimal. Hal ini membuktikan bahwa efisiensi transformator tidak hanya ditentukan oleh besaran beban, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kestabilan dan konsistensi kondisi operasional sistem selama periode pengambilan data.

Dari sisi kondisi beban optimal, beban 45 MW secara konsisten mencatatkan efisiensi tertinggi pada bulan November dan Desember, masing-masing mencapai 99,22%, menjadikannya titik operasi paling optimal dari sisi pencapaian efisiensi. Sementara itu, beban 50 MW terbukti sebagai titik operasi yang paling stabil dan konsisten sepanjang keempat bulan penelitian, dengan rugi-rugi total yang berada pada nilai 0,36 MW hingga 0,38 MW dan efisiensi yang bergerak secara lebih konsisten dan terprediksi tanpa fluktuasi yang tajam. Adapun beban 40 MW, meskipun menghasilkan rugi-rugi total terkecil secara absolut pada nilai 0,24 MW hingga 0,31 MW, tidak menghasilkan efisiensi yang optimal karena pada kondisi beban rendah tersebut sistem belum beroperasi pada titik kerjanya yang terbaik, sebagaimana yang terlihat dari nilai efisiensi yang cenderung lebih rendah dan bervariasi pada titik beban tersebut.

Dari sisi anomali dan titik kritis, setiap bulan menunjukkan karakteristik gangguan yang berbeda dan tidak berulang pada lokasi beban yang sama. September mengalami anomali pada beban di kisaran 47,2 MW hingga 45,9 MW. Oktober mengalami anomali pada beban rendah di sekitar 41,1 MW. November mengalami anomali paling parah di rentang beban menengah 45,3 MW hingga 45,5 MW yang menghasilkan nilai efisiensi terendah sepanjang penelitian yaitu 99,05%. Sementara Desember memiliki anomali paling ringan dan paling terkendali, dengan efisiensi tidak pernah turun di bawah 99,14% sepanjang bulan tersebut.

Pola ini mengindikasikan bahwa gangguan operasional tidak bersifat berulang pada lokasi beban yang sama setiap bulannya, melainkan bergeser sesuai dengan kondisi jaringan, perubahan pola konsumsi konsumen di kota Batam, maupun faktor eksternal lainnya yang turut memengaruhi kestabilan sistem.

Secara keseluruhan, hasil analisis selama empat bulan menunjukkan bahwa *Main Transformator* Unit 1 PLTU PT. TJK POWER masih mampu mempertahankan performa operasi yang sangat baik di seluruh kondisi variasi pembebanan yang diamati. Efisiensi transformator tidak pernah turun di bawah 99,05% sepanjang

122 hari operasi, yang mencerminkan bahwa kondisi kinerja transformator masih berada dalam batas operasional yang normal dan tidak menunjukkan adanya indikasi pembebanan berlebih maupun kerusakan peralatan.

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan terhadap efisiensi *Main Transformator* pada Unit 1 PLTU PT. TJK POWER 2 × 65 MW selama periode September hingga Desember 2025, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Analisis mengenai pengaruh variasi pembebanan menunjukkan adanya korelasi langsung antara dinamika beban dengan fluktuasi rugi-rugi daya yang memengaruhi efisiensi. Variasi pembebanan yang diatur oleh *Batam Centre Control* (BCC) terbukti memberikan pengaruh langsung namun tidak bersifat linier sederhana terhadap efisiensi transformator. Peningkatan beban menyebabkan kenaikan arus pada kumparan yang memperbesar rugi-rugi tembaga secara proporsional terhadap kuadrat arus, sedangkan rugi-rugi inti tetap konstan pada nilai 0,03857 MW. Namun, efisiensi juga dipengaruhi secara signifikan oleh faktor eksternal seperti fluktuasi faktor daya, tegangan operasi, dan kestabilan sistem pada saat pengambilan data, sehingga penurunan beban tidak selalu diikuti oleh peningkatan efisiensi secara konstan.
2. Hasil analisis kuantitatif terhadap tiga parameter kondisi pembebanan (40 MW, 45 MW, dan 50 MW) berhasil memetakan karakteristik performa transformator pada berbagai titik kerja operasional. Melalui perhitungan parameter daya dan efisiensi, diperoleh karakteristik spesifik sebagai berikut:
 - a. Kondisi 40 MW: Menghasilkan rugi-rugi total terkecil secara absolut (0,24 MW – 0,31 MW), namun capaian efisiensinya tidak optimal karena sistem belum beroperasi pada titik kerja terbaiknya.
 - b. Kondisi 45 MW: Teridentifikasi sebagai titik operasi paling optimal dengan capaian efisiensi puncak tertinggi secara konsisten mencapai 99,22%.
 - c. Kondisi 50 MW: Menunjukkan representasi sebagai titik operasi paling stabil dan konsisten, di mana parameter arus dan efisiensi (99,12% – 99,18%) bergerak secara terprediksi tanpa adanya fluktuasi tajam.
3. Melalui evaluasi keseluruhan terhadap performa operasional selama 122 hari periode pengamatan, dapat disimpulkan bahwa tingkat reliabilitas dan kapabilitas fungsional transformator berada pada kategori sangat memuaskan. Nilai efisiensi *Main Transformator* Unit 1 secara konsisten terjaga dalam rentang 99,05% hingga 99,24%.

Sekalipun teridentifikasi adanya anomali kritis pada rentang pembebanan 45,3 MW – 45,5 MW yang menghasilkan efisiensi minimum sebesar 99,05% sebagai konsekuensi dari fluktuasi sesaat serta instabilitas sistem pada saat pengambilan data, deviasi tersebut secara teknis masih berada dalam batas toleransi yang diizinkan. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini mengonfirmasi bahwa kondisi teknis transformator tetap andal dan memiliki kelayakan operasional (*operational feasibility*) yang tinggi untuk mendukung kontinuitas suplai energi listrik di wilayah Batam.

5.2 Saran

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

1. Optimalisasi Strategi Pembebanan Operasional Merujuk pada identifikasi beban 45 MW sebagai titik operasi paling optimal dan beban 50 MW sebagai titik kerja paling stabil, disarankan kepada unit pengelola operasional untuk memprioritaskan pengaturan beban pada rentang tersebut guna meminimalkan akumulasi rugi-rugi tembaga. Pendekatan ini sangat krusial untuk menjaga profil efisiensi transformator tetap berada pada level tertinggi, sehingga potensi susut energi selama proses penyaluran daya ke sistem distribusi Batam dapat ditekan secara signifikan.
2. Peningkatan Sistem Pemantauan Parameter Kualitas Daya Mengingat adanya anomali penurunan efisiensi yang dipicu oleh dinamika operasional transien dan fluktuasi faktor daya, diperlukan penguatan sistem pemantauan parameter listrik secara *real-time*. Integrasi sistem pengawasan yang lebih ketat terhadap manajemen beban, terutama saat terjadi instruksi perubahan beban mendadak dari *Batam Centre Control* (BCC), diharapkan dapat memitigasi ketidakseimbangan beban antar-fasa serta menjaga kestabilan efisiensi unit transformator
3. Evaluasi dan Perawatan Preventif Komponen Pendukung sebagai langkah preventif untuk menjaga keandalan (*reliability*) jangka panjang, perlu dilakukan evaluasi teknis secara periodik terhadap sistem kompensasi daya reaktif dan sistem pendingin transformator. Perawatan rutin terhadap komponen-komponen ini sangat penting untuk memastikan bahwa arus yang mengalir pada kumparan tidak meningkat secara tidak proporsional akibat faktor daya yang buruk, yang berisiko mempercepat penuaan isolasi serta menurunkan usia pakai (*loss of life*) peralatan.
4. Ekspansi Parameter pada Penelitian lanjutan untuk penelitian di masa mendatang, disarankan untuk melakukan studi yang lebih mendalam dengan mengintegrasikan parameter eksternal yang belum tercakup secara mendalam dalam penelitian ini, seperti fluktuasi suhu lingkungan, kelembapan, degradasi kualitas minyak isolasi, serta analisis tingkat harmonisa arus. Perluasan variabel penelitian ini akan memberikan gambaran yang lebih presisi mengenai profil efisiensi transformator pada kondisi operasi yang lebih kompleks.

Daftar Pustaka

- [1] E. M. P. Picsta, "Analisa Perhitungan Biaya Rugi-Rugi Daya Pada Transformator Distribusi Di Penyulang Domba Gardu Induk Bukit Siguntang Dengan Metode Nilai Bulanan," 2018.
- [2] M. Anfal, *Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Generator unit 1 Di PLTU PT. TJK POWER Tugas Akhir*. 2025.
- [3] P. Ekonomi, "ANALISI RUGI-RUGI DAYA AKIBAT KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA TRANSFORMATOR ULTG PANAKKUTANG," *Bussiness Law binus*, vol. 7, no. 2, pp. 33–48, 2023.
- [4] P. L. N. Persero and U. L. P. Mattoanging, "ANALISIS EFISIENSI TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 160 KVA DI PT. PLN (PERSERO) ULP MATTOANGING," 2024.
- [5] Y. Basir and M. Helmi, "Analisis Rugi-Rugi Daya Pada Sistem Kelistrikan Bandara Sultan Mahmud Badaruddin li Palembang," *Infolek J. Tek. Elektro*, no. 0017, 2024.
- [6] H. Subagio and L. Cucu Sumartini, "Analisis Kapasitas Daya Trafo Pada Pemeriksaan K3 Instalasi Listrik di PT. Win Textile," *JET J. Elektro Tek.*, vol. 1, no. 2, pp. 22–27, 2021.
- [7] S. Ashari and M. Asrul, "ANALISIS PENAMBAHAN TRANSFORMATOR UNTUK MENANGGULANGI KELEBIHAN BEBAN PADA TRANSFORMATOR PENYULANG KAJANG," 2024.
- [8] "CARA KERJA DAN FUNGSI BAGIAN-BAGIAN TRAF0," BLOGANTON.WEB.ID. [Online]. Available: <https://www.bloganton.web.id/2012/11/cara-kerja-dan-fungsi-bagian-bagian.html>
- [9] B. A. B. li, "TINJAUAN PUSTAKA 2 . 2 Perhitungan Arus Beban Penuh Trafo," pp. 4–20.
- [10] Y. P. Tondok *et al.*, "Perencanaan Transformator Distribusi 125 kVA," vol. 8, no. 2, pp. 83–92, 2019.
- [11] "9 BAGIAN TRANSFORMATOR DAN GAMBARNYA SECARA LENGKAP," EMPAT PILAR.COM. [Online]. Available: <https://www.empatpilar.com/bagian-transformator/>
- [12] "Pengertian Transformator (Trafo) dan Prinsip Kerjanya," TEKNIK ELEKTRONIKA. [Online]. Available: <https://teknikelektronika.com/pengertian-transformator-prinsip-kerja-trafo/>
- [13] A. Supriyadi, "Hubungan Pada Transformator Tiga Fasa," *Forum Teknol.*, vol. 07, no. 1, pp. 45–52, 2017.
- [14] J. M. Huwae, M. A. F. Haurissa, and H. L. Latupeirissa, "Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi," *J. Fortech*, vol. 6, No. 1, pp. 1–7, 2025.

[15] "Alamat Perusahaan Selama magang pada PLTU PT. TJK POWER," 2025.