



Analisis Pengaruh Temperatur Ruangan terhadap Karakteristik Operasi Transformator Kering pada Sistem Distribusi Listrik PLTU PT Bintan Alumina Indonesia

Tugas Akhir

**Oleh:
Akmal Ramadan (4232211019)**

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

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir

Saya yang bertanda tangan dibawah ini menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya yang berjudul : **Analisis Pengaruh Temperatur Ruangan terhadap Karakteristik Operasi Transformator Kering pada Sistem Distribusi Listrik PLTU PT Bintan Alumina Indonesia** 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, 6 mei 2026



Akmal Ramadan
NIM: 4232211019

Lembar Pengesahan Industri

Data Tugas Akhir ini bebas dari plagiasi dan mendapat izin untuk disimpan, dikelola dan dipublikasikan untuk kepentingan Akademik.

Disusun oleh: Akmal Ramadan

Program Studi: Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi (TRPE)
Jurusan: Teknik Elektro (Politeknik Negeri Batam)

Judul Tugas Akhir: Analisis Efektivitas Sistem Pendingin Ruangan terhadap Kinerja Operasional Transformator Kering pada Sistem Distribusi Listrik PLTU PT BAI Bintang

Perusahaan: PT BAI Bintang

Disetujui oleh :

Dosen Pembimbing:



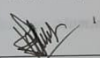
Nama: Ir. Fauzun Atabiq, S.T., M.Cs
NIK : 110073

Pembimbing Industri:



Nama: Shahiburrahman
NIK : I21070058

HRD/Manager



Nama: Deprianto
NIK : I2007003

Lembar Pengesahan

Tugas Akhir disusun untuk digunakan sebagai syarat kelulusan pada pelaksanaan Tugas Akhir

Disusun oleh:
Akmal Ramadan (4232211019)

Tanggal Seminar: 13 januari 2026

Disetujui oleh :

Penguji I



Ir. Kaisar Wisnu Kita, S.T., M.Sc.
NIK: 123290

Pembimbing I



Ir. Fauzun Atabiq, S.T., M.Cs
NIK: 110073

Penguji II



Robi Kurniawan, S.T., M.T.
NIK: 125356

Analisis Pengaruh Temperatur Ruangan terhadap Karakteristik Operasi Transformator Kering pada Sistem Distribusi Listrik PLTU PT Bintan Alumina Indonesia

Abstrak

PLTU PT Bintan Alumina Indonesia memanfaatkan transformator kering berkapasitas 630 kVA di area desulfurisasi yang memiliki karakteristik lingkungan kerja bersuhu tinggi. Karena media pendinginannya sangat bergantung pada sirkulasi udara sekitar, fluktuasi suhu ruangan berpotensi memengaruhi keandalan operasional transformator. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan efektivitas sistem pendingin ruangan (AC) dan variasi pembebanan terhadap kestabilan suhu operasional komponen *core*, HV, dan LV pada transformator kering tersebut. Metode yang digunakan adalah kuantitatif deskriptif dan inferensial melalui pengumpulan data lapangan pada shift pagi, sore, dan malam, yang dianalisis menggunakan korelasi *Pearson*, regresi linear sederhana, dan koefisien determinasi (R^2). Parameter yang diukur meliputi suhu internal transformator, suhu ruangan, suhu hembusan AC, set point, dan parameter pembebanan arus tiap fasa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor pembebanan transformator berada pada kondisi stabil yang rendah di kisaran 41.58%–44.76% dari kapasitas nominalnya, sehingga fluktuasi panas operasional tidak didominasi oleh arus beban ($R^2 = 15.67\%$). Sebaliknya, pengkondisian suhu ruangan (berkisar 26.2°C–29.7°C) menunjukkan hubungan positif moderat terhadap suhu *core* dengan kontribusi sebesar $R^2 = 32.1\%$. Kenaikan suhu (*temperature rise*) *hotspot* tertinggi tercatat sebesar 55°C dan terendah sebesar 16.3°C. Berdasarkan standar IEC 60076-11 untuk kelas isolasi F (155°C), seluruh temperatur operasional belitan masih berada jauh di bawah batas suhu alarm (130°C) maupun batas trip (150°C). Sistem pendingin ruangan yang bekerja secara optimal bersama kipas internal terbukti efektif menjaga keandalan termal transformator tetap stabil selama periode observasi.

Kata kunci: transformator kering, sistem pendingin ruangan, suhu *hotspot*, pembebanan transformator, analisis regresi.

Analysis of the Effect of Ambient Temperature on the Operating Characteristics of Dry-Type Transformers in the Electrical Distribution System of PT Bintan Alumina Indonesia's Coal-Fired Power Plant

Abstract

PT Bintan Alumina Indonesia's coal-fired power plant utilizes a 630 kVA dry-type transformer in the desulfurization area, which is characterized by high-temperature working conditions. Since its cooling medium relies heavily on ambient air circulation, fluctuations in room temperature potentially affect the operational reliability of the transformer. This study aims to analyze the relationship between the effectiveness of the room air conditioning (AC) system and loading variations on the operational temperature stability of the core, HV, and LV components of the dry-type transformer. A quantitative descriptive and inferential method was used, involving field data collection during morning, afternoon, and night shifts, which were analyzed using Pearson correlation, simple linear regression, and coefficient of determination (R^2). The measured parameters included the transformer's internal temperature, ambient room temperature, AC airflow temperature, set points, and phase current load parameters. The results indicate that the transformer's load factor remained stable and low, ranging from 41.58% to 44.76% of its rated capacity; hence, operational heat fluctuations were not dominated by the load current ($R^2 = 15.67\%$). In contrast, ambient room temperature conditioning (ranging from 26.2°C to 29.7°C) demonstrated a moderate positive relationship with the core temperature, contributing $R^2 = 32.1\%$. The highest recorded hotspot temperature rise was 55°C, while the lowest was 16.3°C. According to the IEC 60076-11 standard for Class F (155°C) insulation, all winding operational temperatures remained well below the alarm limit (130°C) and trip limit (150°C). The optimally functioning room cooling system, supported by internal fans, proved highly effective in maintaining the transformer's thermal reliability during the observation period.

Keywords: *dry-type transformer, room cooling system, hotspot temperature, transformer loading, regression analysis.*

Kata Pengantar

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Analisis Pengaruh Temperatur Ruang terhadap Karakteristik Operasi Transformator Kering pada Sistem Distribusi Listrik PLTU PT Bintang Alumina Indonesia”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T) pada Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Batam. Penulis menyadari bahwa selesainya laporan ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Orang tua, Kakak, dan Keluarga tercinta yang selalu memberikan doa, kasih sayang, serta dukungan yang tidak terhingga sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Ir. Bambang Hendrawan, ST., MSM., CIPMP., CISC. selaku Direktur Politeknik Negeri Batam.
3. Bapak Ir. Indra Hardian Mulyadi, S.T., M.Eng., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
4. Bapak Irwanto Zarma Putra, S.Pd., M.Eng., selaku Ketua Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi.
5. Bapak Ir. Fauzun Atabiq, S.T., M.Cs., selaku Dosen Pembimbing yang selalu mengarahkan, memberikan bimbingan, motivasi, serta dorongan moral hingga tugas akhir ini selesai.
6. Bapak Ir. Muhammad Syafei Gozali, S.T., M.T selaku Dosen Wali Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi.
7. Bapak Lalu Kaisar Wisnu Kita, S.T., M.Sc., selaku Dosen Penguji I yang telah memberikan arahan dan saran dalam penyusunan tugas akhir ini.
8. Bapak Robi Kurniawan, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat berharga demi kesempurnaan laporan ini.
9. Bapak Jhon Hericson Purba, S.Pd., M.Pd., selaku Dosen Pengampu mata kuliah Tugas Akhir.
10. Segenap Dosen Pengajar Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu serta pengalaman luar biasa selama masa perkuliahan.
11. Bang Shahiburrahman dan Firyal Syafiqoh, selaku Pembimbing Lapangan di PLTU PT Bintang Alumina Indonesia yang telah meluangkan waktu,

membantu pengambilan data, memberikan ilmu yang bermanfaat, serta semangat kepada penulis.

12. Segenap Staf PLTU PT Bintan Alumina Indonesia, Bang Raju, Bang Saipul, Bang Yadi, Bang Edo, dan Bang Martin, atas kerja sama dan bantuannya di lapangan selama masa penelitian.
13. Rekan-rekan Seangkatan dan Seperjuangan Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Politeknik Negeri Batam, atas dukungan dan bantuan selama ini.
14. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah turut membantu kelancaran penyelesaian Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari laporan ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan perkembangan ilmu pengetahuan.

Batam, 21 April 2026



Akmal Ramadan

Daftar Isi

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir	Error! Bookmark not defined.
Lembar Pengesahan	3
Abstrak	4
<i>Abstract</i>	5
Kata Pengantar	6
Daftar Isi	8
Daftar Gambar	10
Daftar Tabel	11
Bab 1. Pendahuluan	12
1.1 Latar Belakang	12
1.2 Rumusan Masalah	13
1.3 Tujuan	13
1.4 Manfaat	13
1.5 Batasan Masalah	14
Bab 2. Tinjauan Pustaka	15
2.1 Gambaran Umum Transformator Kering	15
2.2 Sistem Pendinginan Transformator Kering	16
2.3 Suhu Operasional (LV, HV, dan <i>Core</i>)	17
2.4 Hubungan Beban terhadap Suhu Transformator	17
2.5 Sistem Pendinginan Ruangan (AC) pada Lingkungan Industri	18
2.6 Kinerja Operasional Transformator	19
Persamaan Menentukan Kinerja Transformator Kering	20
2.6.1 Kinerja trafo	20
2.6.2 Efisiensi Trafo	20
2.6.3 Kinerja Termal dan Suhu Titik Panas (<i>Hotspot</i>)	21
2.7 Batas Suhu Operasional Transformator	21

Bab 3. Metodologi Penelitian	22
3.1 Perancangan	22
3.1.1 Sistem Pendinginan Ruangan	23
3.2 Jenis Penelitian	23
3.3 Alat dan Bahan	23
3.4 Pengujian	24
3.5 Lokasi dan Waktu Penelitian	24
3.6 Objek Penelitian dan Spesifikasi Alat	25
3.7 Prosedur Pengumpulan Data dan Instrumen Pengukuran	28
3.8 Perhitungan dan Pengolahan Data	29
3.8.1 Rumus Perhitungan	29
3.8.2 Analisis Siang–Malam.....	30
3.8.3 Analisis Profil Harian	30
3.8.4 Analisis Korelasi.....	30
3.9 Metode Analisis Data (Berbasis Rumusan Masalah)	31
3.10 Teknik Analisis Data	31
Bab 4. Hasil dan Pembahasan	33
4.1 Hasil dan Pembahasan	33
4.1.1 Kondisi Operasi Sistem Pendingin dan Temperatur operasi transformator.....	33
4.1.2 Kondisi Pembebanan Transformator.....	39
4.2 Hubungan Temperatur Ruangan terhadap Temperatur Transformator....	41
4.2.1 Perhitungan Faktor Pembebanan Transformator	41
4.2.2 Perhitungan Titik Panas Transformator.....	43
4.3 Hubungan Pembebanan terhadap Temperatur Transformator dan Rugi-rugi....	46
4.4 Evaluasi Kinerja Operasional Transformator Berdasarkan Termal.....	47
4.5 Analisis Peran Kipas Internal dan Sistem Perlindungan	48
4.6 Analisis Hubungan Variasi Beban terhadap Perubahan Suhu	48

Bab 5. Kesimpulan dan Saran.....	49
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran	49
Daftar Pustaka.....	50
Biodata	52
Lampiran :	52

Daftar Gambar

Gambar 1. Trafo Kering Desulfurization PLTU PT. Bintang Alumina Indonesia	15
Gambar 2. Bentuk Trafo Kering.....	16
Gambar 3. Kipas Trafo Kering.....	18
Gambar 4. AC Di ruangan.....	18
Gambar 5. Diagram Alir Metodologi Penelitian Sistem Pemantauan Suhu	
Transformator	22
Gambar 6. Ruangan Desulfurisasi	24

Daftar Tabel

Tabel 1. Alat dan Bahan	23
Tabel 2. Nameplate Trafo.....	25
Tabel 3. Nameplate AC.....	26
Tabel 4. Nameplate Thermo gun.....	26
Tabel 5. Nameplate Intelligent Temperature Controller.....	27
Tabel 6. Nameplate CB.....	27
Tabel 7. Nameplate Thermo-Hygrometer Digital.....	28
Tabel 8. Data Sistem Pendingin Ruangan dan Suhu Operasional	
Transformator	33
Tabel 9. Data Pembebanan transformator dan perubahan suhu operasional	
.....	39
Tabel 10. Pembebanan	40
Tabel 11. Data Hasil Perhitungan Faktor Pembebanan Transformator.....	42
Tabel 12. Data Hasil Perhitungan Titik Panas Transformator.....	44
Tabel 13. Data Hasil Perhitungan Faktor Beban dan Kenaikan Suhu	
Transformator	46

Bab 1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

PLTU PT BAI Bintang merupakan salah satu pembangkit listrik yang menyuplai energi untuk kebutuhan industri di kawasan Bintang. Dalam sistem distribusi tenaganya, digunakan beberapa unit transformator kering sebagai penurun tegangan dari jaringan utama agar sesuai dengan kebutuhan peralatan, khususnya di area desulfurisasi yang memiliki suhu ruangan cukup tinggi karena berdekatan dengan proses pembakaran. Kondisi panas di area ini dapat memengaruhi kinerja transformator, sehingga dibutuhkan sistem pendingin ruangan agar suhu kerja tetap stabil dan aman.

Transformator kering adalah jenis trafo yang menggunakan udara atau resin padat sebagai media isolasi tanpa minyak pendingin. Keunggulannya terletak pada tingkat keamanan yang lebih tinggi, tidak mudah terbakar, serta perawatan yang lebih sederhana. Namun, karena pendinginannya hanya mengandalkan udara, performa transformator ini sangat bergantung pada kondisi suhu lingkungan. Jika suhu ruangan meningkat, maka suhu operasional trafo juga ikut naik dan dapat mempercepat penurunan kualitas isolasi.

Penelitian ini diambil karena di lapangan sering terjadi fluktuasi suhu trafo kering di ruang desulfurisasi, terutama saat beban tinggi dan sistem AC tidak bekerja optimal. Beberapa studi menunjukkan bahwa kenaikan suhu yang berlebihan dapat berdampak serius terhadap umur pakai transformator. Setiap kenaikan suhu di atas batas normal berpotensi menggandakan laju penuaan isolasi [1]. Selain itu, pembebanan tinggi tanpa pendinginan yang efektif dapat menurunkan usia transformator secara signifikan, bahkan menyebabkan kerusakan struktural pada isolasi resin cast jika terus-menerus dioperasikan pada suhu tinggi [2]. Sebagai solusi, sistem pendingin ruangan menjadi faktor penting untuk menjaga kestabilan suhu kerja trafo agar efisiensinya tetap tinggi. Penelitian terkini membuktikan bahwa optimasi sistem pendinginan berbasis efisiensi dan biaya mampu memperpanjang umur operasional trafo serta mengurangi rugi-rugi energi [3].

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis hubungan sistem pendingin ruangan terhadap suhu dan keandalan operasional transformator kering di PLTU PT BAI khususnya ruang desulfurisasi, sehingga dapat menjadi acuan dalam peningkatan efisiensi dan strategi perawatan transformator di lingkungan industri pembangkit listrik. Dengan memahami hubungan antara sistem pendinginan, variasi beban, dan perubahan suhu operasional, diharapkan dapat ditemukan rekomendasi praktis untuk menjaga performa transformator tetap optimal dan mencegah kerusakan dini akibat *overheating*.

Penelitian ini krusial untuk dilakukan langsung pada kondisi operasi aktual PLTU karena karakteristik termal transformator kering sangat dipengaruhi oleh dinamika lingkungan kerja riil yang fluktuatif, seperti perubahan beban unit pemakaian sendiri, variasi suhu lingkungan, serta pola operasional ventilasi ruang *desulfurization* yang tidak selalu ideal. Melalui pengambilan data secara langsung di lapangan (*on-site*), korelasi empiris antara efektivitas sistem pendingin ruangan dengan kenaikan temperatur belitan dan inti transformator dapat dianalisis secara akurat dan objektif. Hasil analisis yang berbasis kondisi nyata ini menjadi sangat penting karena memberikan potret validitas performa transformator yang sebenarnya, yang tidak dapat direplikasi secara sempurna melalui simulasi teoritis, sehingga dapat menjadi dasar rekomendasi mitigasi risiko *overheating* dan penentuan kebijakan perawatan preventif (*preventive maintenance*) yang tepat demi menjaga keandalan kontinu sistem kelistrikan di PLTU PT Bintang Alumina Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hubungan sistem pendingin ruangan terhadap suhu operasional transformator kering di ruang desulfurisasi PT BAI Bintan?
2. Sejauh mana kipas internal dan sistem proteksi (*alarm/trip*) berperan dalam menjaga kestabilan suhu transformator?
3. Bagaimana hubungan antara variasi beban terhadap perubahan suhu operasional transformator?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini antara lain:

1. Menganalisis hubungan sistem pendingin ruangan terhadap suhu operasional transformator kering yang beroperasi di ruang desulfurisasi PT BAI Bintan.
2. Mengevaluasi peran kipas internal dan sistem proteksi transformator, seperti alarm dan trip suhu, dalam menjaga kestabilan suhu operasional transformator kering.
3. Mengkaji hubungan antara variasi pembebanan transformator terhadap perubahan suhu operasional pada sisi low voltage (LV), high voltage (HV), dan core.

1.4 Manfaat

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat, yaitu:

1. Bagi perusahaan: sebagai acuan dalam menjaga efisiensi sistem pendinginan dan mencegah kerusakan dini pada transformator.
2. Bagi akademik: menjadi referensi tambahan bagi mahasiswa dan peneliti yang meneliti tentang kinerja transformator kering.
3. Bagi praktisi lapangan: memberikan data aktual tentang hubungan sistem AC terhadap performa transformator pada kondisi kerja nyata

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terfokus, maka batasan masalahnya ditetapkan sebagai berikut:

1. Penelitian hanya dilakukan pada 1 unit transformator kering di ruang desulfurisasi PLTU PT BAI Bintan.
2. Sistem pendingin yang diamati terbatas pada pendingin ruangan dan kipas internal trafo, tanpa melibatkan sistem pendingin eksternal lainnya.
3. Parameter yang diukur meliputi suhu transformator, suhu ruangan, suhu AC, dan beban kerja trafo.
4. Pengambilan data dilakukan selama periode tertentu melalui pencatatan rutin pada tiga *shift* kerja (pagi, sore, malam).
5. Analisis difokuskan pada hubungan antara suhu operasional, variasi beban, serta efektivitas sistem pendingin dalam menjaga keandalan trafo.
6. Keandalan operasional pada penelitian ini dibatasi pada kondisi termal transformator kering yang ditinjau dari suhu dan *temperature rise*, serta tidak mencakup analisis umur sisa, kegagalan sistem, maupun perhitungan indeks keandalan probabilistik

Bab 2. Tinjauan Pustaka

2.1 Gambaran Umum Transformator Kering



Gambar 1. Trafo Kering Desulfurization PLTU PT. Bintang Alumina Indonesia

Sumber : (PT Bintang Alumina Indonesia)

ditunjukkan pada **Gambar 1**, transformator kering ini terletak di area desulfurisasi dengan kondisi lingkungan yang cukup ekstrem. Transformator kering merupakan transformator yang beroperasi tanpa minyak isolasi dan mengandalkan udara sebagai media pendinginan. Desain ini membuatnya lebih aman digunakan di ruang tertutup dan area industri dengan potensi panas tinggi. Secara konstruksi, transformator kering memiliki tiga komponen utama yang menjadi pusat pembangkitan panas, yaitu *winding LV*, *winding HV*, dan inti (*core*). Ketiganya memiliki karakteristik termal yang berbeda.

Winding LV cenderung mengalami kenaikan suhu paling tinggi dibandingkan *HV* maupun *core* karena membawa arus yang lebih besar. Sementara itu, *core* menghasilkan panas akibat rugi *hysteresis* dan *eddy current* [4].

Studi lain menunjukkan bahwa kualitas aliran udara di sekitar transformator berperan besar dalam menentukan distribusi suhu internal. Ketika ventilasi ruangan kurang baik, panas mudah terperangkap sehingga meningkatkan *hotspot* [5].

Perkembangan teknologi transformator kering modern yang menjelaskan bahwa pemilihan material inti, desain sistem isolasi resin, dan struktur jalur udara

sangat berpengaruh terhadap kestabilan temperatur operasional. Oleh karena itu, transformator kering sangat memerlukan kondisi ruangan yang terkontrol agar tetap bekerja dalam batas suhu aman [6].

2.2 Sistem Pendinginan Transformator Kering



Gambar 2. Bentuk Trafo Kering

Sumber : (PT Bintang Alumina Indonesia)

komponen internal seperti kumparan dan inti besi yang ditunjukkan pada **Gambar 2** sangat bergantung pada sirkulasi udara untuk pembuangan panas. Berbeda dengan transformator minyak, sistem pendinginan pada transformator kering sepenuhnya bergantung pada aliran udara alami (AN) atau aliran udara paksa (AF) menggunakan kipas. Jika transformator ditempatkan di ruang bersuhu tinggi seperti ruang desulfurisasi, performa pendinginan alami sering kali tidak cukup sehingga memerlukan dukungan sistem pendingin ruangan, yaitu AC.

Peningkatan kecepatan aliran udara di sekitar transformator secara signifikan menurunkan suhu *hotspot winding* [7]. optimasi pendinginan mampu menekan rugi-rugi panas dan menjaga efisiensi operasional transformator [3].

Pada transformator resin cast, kinerja pendinginan dipengaruhi oleh jalur sirkulasi udara di sekitar *winding* dan *core* [8]. memetakan aliran panas dan menemukan bahwa area kumparan LV adalah bagian yang paling kritis sehingga memerlukan aliran udara yang stabil dan cukup [4].

Dengan demikian, sistem pendinginan tidak hanya bergantung pada kipas internal transformator, tetapi juga sangat ditentukan oleh keadaan ruangan,

termasuk temperatur udara masuk dari AC, set point pendingin, dan arah hembusan udara.

2.3 Suhu Operasional (LV, HV, dan Core)

Suhu operasional transformator kering dapat dibagi menjadi tiga kategori utama sesuai titik pengukurannya, yaitu:

1. Suhu *winding* LV – biasanya paling tinggi karena membawa arus lebih besar.
2. Suhu *winding* HV – cenderung lebih rendah, namun tetap meningkat seiring beban dan temperatur lingkungan.
3. Suhu *core* – ditentukan oleh material inti dan rugi *fluks* magnetik.

Ketiga titik ini mengalami kenaikan suhu yang dipengaruhi oleh beban, kualitas pendinginan, dan kondisi ruang sekitar. Ketika beban naik atau pendinginan tidak optimal, suhu *winding* dapat melonjak cepat dan mendekati batas termal isolasi [4]. Penumpukan panas pada *winding* LV berpotensi menyebabkan penurunan performa isolasi jika dibiarkan berulang dalam jangka panjang [9]. Kestabilan suhu *core* sangat ditentukan oleh distribusi aliran udara di ruang transformator [10], [11].

Selain itu, penelitian mengenai model termal transformator resin cast menunjukkan bahwa dinamika suhu *winding* LV, HV, dan inti dipengaruhi oleh karakteristik material isolasi, kecepatan aliran udara, dan respons termal konduksi di dalam kumparan. Model ini mampu menggambarkan perubahan suhu internal transformator secara akurat saat terjadi variasi beban maupun perubahan kondisi pendinginan [11].

2.4 Hubungan Beban terhadap Suhu Transformator

Beban adalah faktor yang sangat mempengaruhi suhu operasional transformator kering. Setiap kenaikan arus menghasilkan peningkatan rugi tembaga (I^2R), yang berujung pada kenaikan suhu *winding*. Hal yang ditemukan bahwa pada transformator 630 kVA, kenaikan beban memiliki korelasi langsung dengan kenaikan suhu LV/HV serta mempercepat penurunan umur isolasi [1]. Beban yang tidak seimbang antar fasa menyebabkan peningkatan suhu yang tidak merata dan dapat memicu *hotspot* lokal [12]. Bahwa kenaikan dari batas operasi normal dapat mempercepat penuaan isolasi resin cast secara eksponensial [2].

Untuk membedakan kenaikan suhu akibat pembebanan dan kenaikan suhu akibat kondisi lingkungan, digunakan parameter *temperature rise*, yaitu selisih antara suhu transformator dan suhu lingkungan. Parameter ini umum digunakan dalam analisis termal transformator karena mampu merepresentasikan panas yang dihasilkan akibat rugi-rugi internal transformator secara lebih objektif dibandingkan suhu absolut [2].

Dengan demikian, beban transformator harus dijaga agar tetap berada dalam rentang aman, terutama ketika temperatur ruangan tidak stabil atau sistem pendingin ruangan tidak bekerja secara optimal.

2.5 Sistem Pendinginan Ruangan (AC) pada Lingkungan Industri



Gambar 3. Kipas Trafo Kering

Sumber : (PT Bintang Alumina Indonesia)

Sistem pendinginan paksa *Air Forced* pada transformator ini didukung oleh penggunaan kipas internal yang terpasang di bagian bawah kumparan, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3**.



Gambar 4. AC Di ruangan

Sumber : (PT Bintang Alumina Indonesia)

Selain kipas, suhu ruangan dijaga oleh sistem AC seperti pada **Gambar 4** guna memastikan suhu lingkungan tetap stabil. Pendinginan ruangan menggunakan AC memiliki peran penting dalam menjaga suhu operasional transformator kering yang ditempatkan pada ruang tertutup. Pada lingkungan seperti area desulfurisasi, suhu *ambient* yang tinggi berpotensi mempercepat penumpukan panas pada trafo.

kinerja AC dapat diukur dari tiga indikator utama: Suhu hembusan AC, Perbedaan antara suhu ruangan dan set point AC, Distribusi udara di sekitar transformator [13]. tanpa pengawasan atau penurunan performa AC dapat menyebabkan peningkatan kelembapan ruangan, yang pada akhirnya mengurangi kemampuan udara dalam membawa panas keluar dari transformator [6].

Penelitian lain menunjukkan bahwa pendinginan ruangan yang buruk dapat meningkatkan beban termal transformator hingga 20–30% lebih tinggi daripada kondisi ideal [8]. Hal ini mempertegas pentingnya menjaga AC tetap stabil untuk mempertahankan keandalan transformator kering.

Studi terbaru menunjukkan bahwa pada ruang operasi bersuhu tinggi, suhu *winding* trafo kering meningkat cepat ketika performa AC tidak stabil. Kondisi ruangan yang panas dapat mendorong terjadinya *hotspot* dan meningkatkan risiko *overheating* pada LV maupun *core* [14].

2.6 Kinerja Operasional Transformator

Dalam penelitian ini, keandalan operasional transformator kering ditinjau dari kestabilan suhu kerja selama operasi, karena kondisi termal merupakan indikator utama kesehatan transformator kering.

Keandalan transformator sangat dipengaruhi oleh temperatur operasionalnya. Ketika suhu *winding* atau *core* berada di atas batas aman, proses penuaan isolasi berlangsung lebih cepat dan menyebabkan penurunan keandalan. Isolasi resin cast akan mengalami kerusakan struktural jika terus-menerus dioperasikan pada suhu tinggi [2]. Sistem proteksi internal seperti *temperature controller*, alarm, dan kipas pendingin menjadi lini pertahanan pertama dalam mencegah [9].

Pada ruang dengan beban panas tinggi, kipas internal saja tidak selalu cukup. Setelah melewati suhu tertentu (di PT BAI Bintan suhu di atas 80°C), kipas internal harus aktif, tetapi kestabilan suhu ruangan melalui AC tetap menjadi faktor yang paling menentukan untuk mempertahankan performa transformator dalam jangka panjang.

Kinerja operasional transformator daya ditentukan oleh kemampuan transformator dalam menyalurkan daya listrik secara kontinu dengan kondisi suhu yang tetap berada dalam batas operasi yang aman. Pada transformator kering, kinerja sangat dipengaruhi oleh tingkat pembebanan dan sistem pendinginan yang digunakan selama proses operasi.

Pada kondisi berbeban, arus yang mengalir pada belitan transformator akan menimbulkan rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi inti yang menyebabkan kenaikan suhu pada sisi LV, HV, dan inti transformator. Apabila kenaikan suhu tidak dikendalikan dengan baik, maka dapat menurunkan keandalan operasional transformator kering.

Sistem pendinginan, baik pendinginan udara alami (AN) maupun udara paksa (AF), berperan penting dalam menjaga kestabilan suhu operasional transformator. Oleh karena itu, kinerja operasional transformator daya dapat dianalisis melalui hubungan antara tingkat pembebanan, sistem pendinginan, dan suhu operasional transformator[1].

Persamaan Menentukan Kinerja Transformator Kering

Berdasarkan penelitian [1], kinerja operasional transformator kering (*dry-type*) sangat ditentukan oleh kemampuan sistem pendingin dalam menjaga suhu belitan tetap berada pada batas aman operasionalnya. Evaluasi efektivitas pendinginan ruangan terhadap kinerja transformator dilakukan dengan menggunakan parameter-parameter perhitungan sebagai berikut:

2.6.1 Kinerja trafo

Pembebanan merupakan variabel input utama yang menentukan besarnya energi panas yang dihasilkan oleh transformator. Menurut [1] dan [15], persentase pembebanan (K) digunakan untuk memantau sejauh mana transformator bekerja dibandingkan dengan kapasitas nominalnya. Data ini menjadi dasar bagi sistem pendingin untuk menyesuaikan beban pendinginan ruangan. Persamaan pembebanan adalah:

$$K = \frac{S_{aktual}}{S_{nominal}} \quad (2.1)$$

Keterangan:

K = Faktor beban atau rasio pembebanan.

S_{aktual} = Beban aktual terukur (kVA).

$S_{nominal}$ = Kapasitas daya nominal transformator (kVA).

2.6.2 Efisiensi Trafo

Efisiensi merupakan indikator utama dalam menilai kinerja operasional transformator dalam menyalurkan daya. Merujuk pada penelitian [1], nilai efisiensi pada transformator tipe kering sangat bergantung pada fluktuasi pembebanan yang diterima. Penurunan efisiensi disebabkan oleh adanya rugi-rugi daya (*losses*) yang dikonversi menjadi energi panas pada inti besi dan belitan.

adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai efisiensi η (*Eta*) dengan mempertimbangkan faktor pembebanan dan rugi-rugi daya adalah sebagai berikut:

$$P_{cu} = I^2 \times R \quad (2.2)$$

$$P_{in} = P_{out} + (P_{beban\ nol} + P_{cu}) \quad (2.3)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.4)$$

Keterangan:

η = Efisiensi

P_{out} = Daya keluaran (kW)

P_{in} = Daya masukan (kW)

$P_{beban\ nol}$ = Rugi beban nol

P_{cu} = Rugi tembaga

2.6.3 Kinerja Termal dan Suhu Titik Panas (*Hotspot*)

Mengingat karakteristik transformator kering yang menggunakan udara sebagai media pendingin, suhu titik panas (*hotspot*) menjadi parameter kritis dalam menentukan umur isolasi. Berdasarkan pemodelan termal oleh [10] suhu *hotspot* (θ_{hs}) dipengaruhi secara langsung oleh suhu ambien ruangan (θ_a) yang dikontrol oleh sistem pendingin udara (AC). Efektivitas sistem pendingin dinilai dari kemampuannya menjaga suhu kerja tetap berada dalam batas kelas isolasi yang diizinkan melalui hubungan persamaan:

$$\theta_{hs} = \theta_a + \Delta\theta_{hs} \quad (2.5)$$

Keterangan:

θ_{hs} = Suhu titik panas atau *hotspot* (°C)

θ_a = Suhu ambien ruangan yang dikontrol oleh sistem pendingin (°C)

$\Delta\theta_{hs}$ = Kenaikan suhu titik panas akibat pembebanan (°C)

2.7 Batas Suhu Operasional Transformator

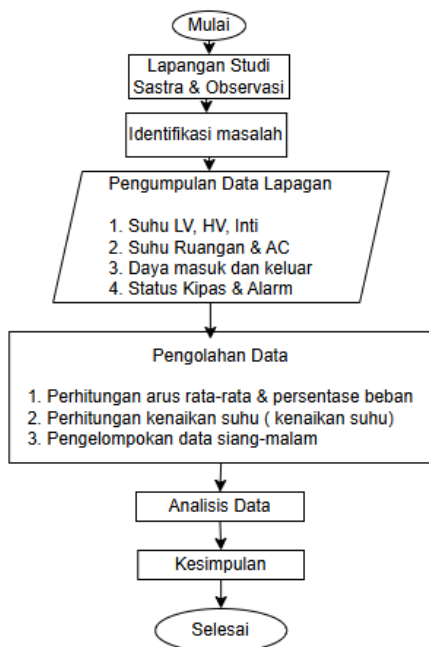
Transformator kering memiliki batasan suhu operasional yang harus dijaga agar tetap bekerja dengan aman dan andal. Berdasarkan standar operasional perusahaan, suhu lingkungan maksimum yang diperbolehkan untuk transformator kering adalah sekitar 40°C. apabila suhu 100°C kipas akan bekerja secara otomatis dan ketika suhu belitan lebih rendah dari 80°C pengoperasian kipas akan dihentikan secara otomatis. Selain itu, sistem proteksi transformator dirancang untuk memberikan peringatan apabila suhu belitan mencapai 130°C, dan akan

melakukan pemutusan operasi (trip) secara otomatis apabila suhu mencapai 150°C [16]. Batasan suhu ini digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi kondisi operasional transformator selama penelitian berlangsung.

Bab 3. Metodologi Penelitian

3.1 Perancangan

Tahapan pelaksanaan penelitian ini disusun secara sistematis yang alur logikanya digambarkan pada **Gambar 5**. Proses dimulai dari identifikasi masalah, pengumpulan data lapangan, hingga tahap analisis dan penarikan kesimpulan



Gambar 5. Diagram Alir Metodologi Penelitian

Sistem Pemantauan Suhu Transformator

Sub sistem pertama pada penelitian ini adalah sistem pemantauan suhu transformator, yang terdiri dari:

1. Sensor suhu LV, HV, dan *Core* pada *Intelligent Temperature Controller*
2. Alarm suhu dan kipas internal
3. Panel indikator untuk pembacaan parameter

Peneliti tidak melakukan modifikasi teknik, sehingga rancangan pemantauan suhu transformator lebih difokuskan pada bagaimana data dari perangkat tersebut digunakan sebagai parameter analisis.

3.1.1 Sistem Pendinginan Ruangan

Sub sistem kedua adalah sistem pendingin ruangan, yang menjadi variabel utama penelitian. Perancangan fokus pada:

1. Penentuan titik ukur suhu ruangan
2. Penentuan posisi pengukuran suhu hembusan AC
3. Pencatatan *set point* AC
4. Evaluasi performa pendinginan berdasarkan variasi beban transformator

3.2 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif. Pendekatan ini dipilih karena seluruh data yang dianalisis berupa angka hasil pengukuran langsung di lapangan, seperti suhu transformator, suhu ruangan, performa AC, serta arus beban pada masing-masing fasa.

3.3 Alat dan Bahan

Penelitian ini tidak menggunakan perangkat eksperimen khusus karena seluruh pengukuran bergantung pada alat yang sudah tersedia di ruang transformator, yaitu:

Tabel 1. Alat dan Bahan

NO	Alat/Bahan	Fungsi
1	<i>Intelligent Temperature Controller</i>	Pembacaan suhu LV/HV/ <i>Core</i> dan status kipas
2	Thermometer <i>Infrared</i>	Pengukuran suhu hembusan AC secara periodik
3	Panel <i>Circuit Breaker</i> (CB) / DCS	Pembacaan arus R,S,T

NO	Alat/Bahan	Fungsi
4	Termo-hygrometer ruang digital	Pengukur suhu di dua titik (dekat trafo & dekat AC)
5	<i>Word logsheet</i>	Pencatatan data per <i>shift</i>

3.4 Pengujian

Pengambilan data dilakukan sebanyak 8 kali dengan setiap 3 hari, serta dilaksanakan pada *shift* pagi, sore, dan malam :

1. Suhu LV
2. Suhu HV
3. Suhu Core
4. Suhu ruangan
5. Suhu hembusan AC
6. Set point AC
7. Arus fasa R, S, T
8. P, Q, S
9. Status kipas
10. Alarm/trip jika terjadi

3.5 Lokasi dan Waktu Penelitian



Gambar 6. Ruangan Desulfurisasi

Sumber : (PT Bintan Alumina Indonesia)

Pengambilan data dilakukan secara langsung di ruang trafo desulfurisasi yang denahnya diperlihatkan pada **Gambar 6**. Penelitian dilaksanakan di PLTU PT Bintan Alumina Indonesia, khususnya pada ruang trafo desulfurisasi yang menggunakan transformator kering dengan pendingin ruangan. Pengambilan data dilakukan selama periode tertentu dengan pembagian waktu berdasarkan tiga *shift* kerja (sore, malam, pagi). Pada setiap *shift* dilakukan dua kali pengambilan data (awal *shift* dan akhir *shift*) sehingga diperoleh gambaran kondisi siang dan malam untuk analisis perbandingan suhu.

3.6 Objek Penelitian dan Spesifikasi Alat

Tabel 2. Nameplate Trafo

Parameter / Spesifikasi	Nilai atau Data dari Transformator
Type produk	SCB10 (Dry Type Transformer)
Daya Terpasang (rated power)	630 kVA
Tegangan sisi tinggi (HV)	6,3 kV
Tegangan sisi rendah (LV)	0,4 kV
Arus nominal HV	57,7 A
Arus nominal LV	909,3 A
Frekuensi	50 Hz
Jumlah fasa	3 fasa
Kelas isolasi termal	Class F
Batas kenaikan suhu	sesuai nameplate (sekitar 80 K)
Jenis pendingin trafo	AN/AF (Air Natural/Air Forced)
Lokasi instalasi	Indoor

Objek penelitian adalah unit dengan spesifikasi umum:

1. Transformator ini bekerja untuk menyuplai beban proses desulfurisasi
2. Sehingga kondisi termalnya sangat dipengaruhi suhu ruangan dan performa AC

Objek utama penelitian ini adalah satu unit transformator kering (*dry-type transformer*) berkapasitas 630 kVA yang melayani beban di area desulfurisasi. Data teknis yang digunakan sebagai acuan standar operasional diambil langsung dari papan nama (*nameplate*) unit, yang mencakup informasi kapasitas, tegangan, hingga batas kenaikan suhu yang diizinkan. Spesifikasi lengkapnya dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Alat tersebut meliputi *Intelligent Temperature Controller* untuk memantau suhu internal kumparan, *Thermo gun* untuk mengukur titik panas permukaan secara instan, dan *Hygrometer* untuk memantau kelembapan serta suhu ruang. Detail spesifikasi masing-masing alat dijabarkan pada **Tabel 3 hingga Tabel 5**.

Tabel 3. Nameplate AC

Parameter / Spesifikasi	Nilai atau Data dari AC
Type produk	GVC-48CDC/I
Tegangan	220V
Frekuensi	50Hz
Kapasitas Pendinginan	13200 W
Volume Aliran Udara	1800m ³ /h
Tingkat Kebisingan	50dB(A)
Berat Unit	59kg
Tanggal Produksi	2018.05

Tabel 4. Nameplate Thermo gun

Parameter / Spesifikasi	Nilai atau Data dari Thermo gun
Merek/ Tipe	Fluke MT4 MAX
Jenis Alat	Infrared Thermometer (Non-Contact)
Rentang Pengukuran Suhu	-30°C sampai 400 °C
Akurasi Pengukuran	±2 °C atau ±2% (mana yang lebih besar)
Resolusi Tampilan	0.1 °C
Emissivity	Tetap (fixed) 0,95
Rasio Jarak ke Titik Ukur (D:S)	8 :1
Waktu Respon	< 500 ms
Laser Pointer	Single laser
Sumber Daya	Baterai AAA
Metode Pengukuran	Non-kontak (infrared)

Untuk menjamin akurasi data suhu dan lingkungan, penelitian ini menggunakan instrumen ukur yang terstandarisasi. Alat tersebut meliputi *Intelligent Temperature Controller* untuk memantau suhu internal kumparan, *Thermo gun* untuk mengukur titik panas permukaan secara instan, dan

Hygrometer untuk memantau kelembapan serta suhu ruang. Detail spesifikasi masing-masing alat dijabarkan pada **Tabel 3 hingga Tabel 5**.

Tabel 5. Nameplate Intelligent Temperature Controller

Parameter / Spesifikasi	Nilai atau Data dari (ITC)
Jenis Perangkat	Intelligent <i>Temperature</i> Controller
Fungsi Utama	Monitoring suhu Transformator kering
Jumlah Kanal	3 kanal (Phase A, Phase B, Phase C)
Sensor Input	Thermocouple
Jenis Sensor	Thermocouple tipe K
Satuan Tampilan	°C (derajat Celcius)
Resolusi Tampilan	0,2°C
Metode Pengukuran	Kontak (Melalui sensor thermocouple)
Mode Operasi	Manual & Otomatis
Fitur Alarm	Overtemperature alarm
Fungsi Tambahan	Indikator suhu real-time tiga fasa

Selain alat ukur, data spesifikasi dari perangkat distribusi daya (*Switchgear*) dan sistem pendingin ruangan (AC) juga dikumpulkan. Spesifikasi panel pada **Tabel 6** digunakan untuk memantau beban arus, sedangkan spesifikasi AC pada **Tabel 7** digunakan untuk mengevaluasi apakah kapasitas pendinginan (BTU/h) sudah sesuai dengan beban panas yang dihasilkan oleh ruangan tersebut.

Tabel 6. Nameplate CB

Parameter / Spesifikasi	Nilai atau Data dari CB
Nama Panel	Panel Distribusi Tegangan Rendah
Tipe Panel	MNS (Modular Low Voltage Switchgear)
Fungsi	Distribusi dan proteksi daya listrik
Tegangan Kerja	380 / 400 V AC

Parameter / Spesifikasi	Nilai atau Data dari CB
Sistem	3 Fasa
Frekuensi	50 Hz
Pemutus Utama	Air Circuit Breaker (ACB)
Merek Pemutus	Schneider Electric
Sistem Proteksi	Overcurrent & Short Circuit
Instrumen Ukur	Power meter digital
Parameter Terukur	Arus fasa R, S, dan T

Tabel 7. Nameplate Thermo-Hygrometer Digital

Parameter / Spesifikasi	Nilai atau Data dari Thermo-Hygrometer Digital
Jenis Alat	Thermo-Hygrometer Digital
Tipe	HTC-1
Parameter Terukur	Suhu udara dan kelembapan
Rentang Suhu	-10 °C sampai 50 °C
Akurasi Suhu	± 1 °C
Resolusi Suhu	0,1 °C
Rentang Kelembapan	10 % - 99 % RH
Akurasi Kelembapan	± 5 % RH
Metode Pengukuran	Kontak udara (ambient)
Tampilan	Digital LCD
Fungsi Tambahan	Jam & indikator kelembapan

3.7 Prosedur Pengumpulan Data dan Instrumen Pengukuran

1. Mencatat suhu LV, HV, dan *Core* dari *controller* pada setiap *shift*.
2. Mengukur suhu ruangan
3. Mengukur suhu hembusan AC menggunakan thermometer infrared sesuai kebutuhan.
4. Mencatat set *point* AC.
5. Mengambil data arus tiap fasa (R, S, T) dari CB atau DCS.
6. Mengamati P Q S *incoming* dan *outgoing*
7. Mengamati status kipas internal (aktif atau tidak).
8. Mencatat alarm atau *trip* jika terjadi.
9. Mengisi seluruh parameter pada *logsheet* harian.

Pada penelitian ini, nilai suhu titik panas (hotspot) diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan thermometer infrared yang diarahkan pada permukaan inti transformator. Nilai tersebut digunakan sebagai pendekatan (representasi) suhu hotspot karena keterbatasan akses pengukuran langsung pada bagian internal transformator. Hal ini dilakukan karena pengukuran langsung suhu hotspot pada kumparan tidak memungkinkan tanpa alat sensor internal.

Pengambilan data suhu dilakukan pada kondisi operasi normal transformator. Thermocouple digunakan sebagai acuan suhu aktual, sedangkan pengukuran menggunakan infrared thermometer dilakukan pada titik yang sama atau area terdekat dari titik thermocouple dengan jarak pengukuran sekitar 30–50 cm dari permukaan objek.

Pengukuran suhu dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap titik ukur, kemudian nilai rata-rata digunakan sebagai data suhu transformator. Selain suhu transformator, suhu lingkungan di sekitar transformator juga diukur untuk keperluan perhitungan *temperature rise*

Pengukuran suhu transformator kering pada penelitian ini dilakukan menggunakan dua jenis alat ukur, yaitu thermocouple dan infrared thermometer (thermo gun). Penggunaan dua alat ukur ini bertujuan untuk memperoleh data suhu yang lebih representatif dan meningkatkan keandalan hasil pengukuran.

Thermocouple digunakan untuk mengukur suhu aktual pada titik pengukuran tertentu yang telah tersedia pada transformator, sedangkan infrared thermometer digunakan untuk mengukur suhu permukaan transformator secara non-kontak, sehingga tidak mengganggu operasi peralatan dan tetap memenuhi aspek keselamatan kerja.

3.8 Perhitungan dan Pengolahan Data

3.8.1 Rumus Perhitungan

Efisiensi merupakan indikator utama dalam menilai kinerja operasional transformator dalam menyalurkan daya. Merujuk pada penelitian[1], nilai efisiensi pada transformator tipe kering sangat bergantung pada fluktuasi pembebanan yang diterima. Penurunan efisiensi disebabkan oleh adanya rugi-rugi daya (*losses*) yang dikonversi menjadi energi panas pada inti besi dan belitan.

adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai efisiensi η (*Eta*) dengan mempertimbangkan faktor pembebanan dan rugi-rugi daya adalah sebagai berikut:

$$P_{cu} = I^2 \times R \quad (3.1)$$

$$P_{in} = P_{out} + (P_{beban\ nol} + P_{cu}) \quad (3.2)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3.3)$$

Keterangan:

η = Efisiensi

P_{out} = Daya keluaran (kW)

P_{in} = Daya masukan (kW)

$P_{beban\ nol}$ = Rugi beban nol

P_{cu} = Rugi tembaga

3.8.2 Analisis Siang–Malam

Analisis siang-malam dilakukan untuk membandingkan kondisi termal transformator pada periode waktu berbeda dalam satu hari. Data dari setiap *shift* dikelompokkan menjadi dua kategori berdasarkan suhu ambient:

1. Periode Siang: Data dari *shift* sore dan awal *shift* malam (suhu sekitar tinggi)
2. Periode Malam: Data dari akhir *shift* malam dan *shift* pagi (suhu sekitar rendah)

Parameter yang dibandingkan meliputi suhu ruangan, suhu transformator (LV, HV, *Core*), performa AC (selisih suhu ruangan dengan *set point*), dan beban operasional. Analisis dilakukan secara deskriptif dan komparatif untuk mengidentifikasi karakteristik pola fluktuasi suhu, mengevaluasi efektivitas sistem pendingin ruangan pada kondisi berbeda, serta mendeteksi periode kritis dimana risiko *overheating* paling tinggi

3.8.3 Analisis Profil Harian

Data suhu dan pembebanan akan diolah menjadi rata-rata per jam selama periode pengamatan satu bulan untuk memperoleh profil harian transformator. Selain itu, ditentukan nilai maksimum dan minimum untuk melihat rentang fluktuasi parameter.

3.8.4 Analisis Korelasi

Analisis hubungan antar variabel dilakukan menggunakan metode scatter plot antara:

- Beban vs suhu transformator
- Suhu ruangan vs suhu transformator

Hubungan dianalisis secara visual dan deskriptif untuk menentukan apakah bersifat positif, negatif, atau tidak memiliki korelasi.

3.9 Metode Analisis Data (Berbasis Rumusan Masalah)

Metode analisis data dalam penelitian ini dilakukan secara deskriptif dan komparatif untuk mengevaluasi efektivitas sistem pendingin ruangan terhadap performa transformator. Langkah-langkah analisis yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Tahap ini menganalisis hubungan efektivitas pendinginan ruangan dalam menjaga kestabilan suhu pada sisi LV, HV, dan inti transformator kering. Analisis dilakukan dengan membandingkan suhu aktual terhadap suhu ruangan (θ_A) untuk melihat pengaruh sistem pendingin terhadap suhu transformator.
2. Penelitian ini menyalakan peran kipas internal transformator serta sistem proteksi berupa alarm dan suhu trip. Analisis dilakukan secara deskriptif berdasarkan kondisi operasional di lapangan untuk mengetahui kontribusi sistem tersebut dalam menjaga kestabilan suhu transformator.
3. Tahap ini menganalisis hubungan antara pembebanan transformator dengan perubahan suhu operasional. Data pembebanan dihitung menggunakan rumus (2.6.1), sedangkan suhu dijelaskan menggunakan rumus (2.6.3), sehingga dapat diketahui pengaruh beban terhadap kenaikan suhu transformator.

3.10 Teknik Analisis Data

Untuk mengetahui tingkat keeratan hubungan dan pengaruh antara variabel independen (misalnya: beban transformator dan suhu lingkungan) terhadap variabel dependen (misalnya: suhu operasional/koefisien keandalan transformator kering), data yang telah dikumpulkan akan dianalisis menggunakan pendekatan statistik kuantitatif secara inferensial. Tahapan analisis data statistik yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Analisis Korelasi Pearson (*Pearson Product Moment*): Digunakan untuk menguji dan menentukan kekuatan serta arah hubungan linear antara dua variabel yang berskala interval atau rasio.
2. Analisis Regresi Linear Sederhana/Berganda: Digunakan untuk memodelkan hubungan fungsional secara matematis dan memprediksi sejauh mana pengaruh perubahan variabel independen terhadap variabel dependen.
3. Koefisien Determinasi (R^2): Digunakan untuk mengukur seberapa besar persentase variasi dari variabel dependen yang dapat dijelaskan secara

simultan oleh variabel independen di dalam model regresi yang dibentuk.

Bab 4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil dan Pembahasan

Tujuan : Menjelaskan Karakteristik termal transformator terhadap kondisi pendinginan.

Data hasil pengukuran diperoleh melalui pengamatan langsung pada transformator kering 630 kVA di ruang desulfurisasi PLTU PT Bintang Alumina Indonesia. Parameter yang diamati meliputi suhu core transformator, suhu HV, suhu LV, suhu ruangan, dan suhu hembusan AC pada shift pagi, sore, dan malam selama periode penelitian berlangsung. Data hasil pengukuran suhu transformator dan kondisi pendingin ruangan dapat dilihat pada Tabel 8 sampai Tabel 11.

4.1.1 Kondisi Operasi Sistem Pendingin dan Temperatur operasi transformator

Hasil pengamatan lapangan terhadap pengkondisian sistem pendingin udara (AC) serta respons suhu operasional komponen transformator (*Low Voltage, High Voltage, dan Core*) pada berbagai periode shift disajikan pada Tabel 8.

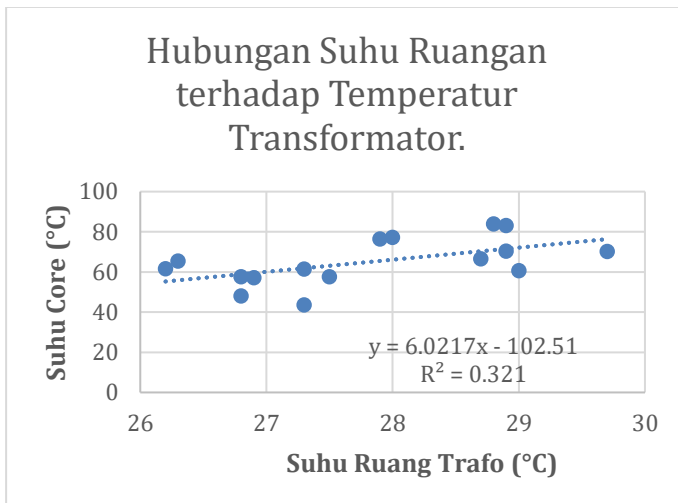
Tabel 8. Data Sistem Pendingin Ruangan dan Suhu Operasional Transformator

No	Tanggal	Waktu	Set Point AC (°C)	Suhu Hembusan AC	Suhu Ruang Trafo (°C)	Suhu Core (°C)	Suhu HV (°C)	Suhu LV (°C)	Status Fan
1	5/2/2026	16:00	25	18,9	28,8	83,8	36	43,4	OFF
2	5/2/2026	0:00	25	17,3	29,0	60,6	57	58,0	OFF
3	8/2/2026	0:00	19	15,1	28,9	83,1	61	61,1	OFF
4	8/2/2026	8:00	19	16,2	28,7	66,4	46	47,8	OFF
5	11/2/2026	8:00	27	17,0	28,9	70,3	69	63,6	ON
6	11/2/2026	16:00	27	12,4	29,7	70,2	62	65,1	ON
7	14/2/2026	16:00	26	12,9	28,0	77,1	45	47,5	ON
8	14/2/2026	0:00	26	17,2	27,9	76,3	45	48,0	ON
9	17/2/2026	8:00	16	12,0	26,2	61,5	50	53,6	ON
10	17/2/2026	16:00	16	15,1	26,3	65,3	47	47,4	ON

No	Tanggal	Waktu	Set Point AC (°C)	Suhu Hembusan AC	Suhu Ruang Trafo (°C)	Suhu Core (°C)	Suhu HV (°C)	Suhu LV (°C)	Status Fan
11	20/2/2026	16:00	17	14,1	27,5	57,5	44	49,5	ON
12	20/2/2026	0:00	17	12,3	27,3	61,3	50	56,0	ON
13	23/2/2026	0:00	18	15,3	26,8	48,0	43	45,5	ON
14	23/2/2026	8:00	18	12,4	27,3	43,6	41	42,5	ON
15	26/2/2026	8:00	23	17,6	26,9	57,0	40	44,1	ON
16	26/2/2026	16:00	23	9,9	26,8	57,5	40	42,2	ON

Tabel 8. Data Sistem Pendingin Ruangan dan Suhu Operasional Transformator (Lanjutan)

Berdasarkan data pada Tabel 8, fluktuasi suhu ruangan berada pada rentang 26,2°C hingga 29,7°C. Terlihat bahwa perubahan temperatur ruangan memberikan dampak langsung terhadap dinamika suhu *core* dan belitan transformator, di mana peningkatan suhu ambien diikuti oleh kenaikan suhu operasional komponen trafo secara proporsional.



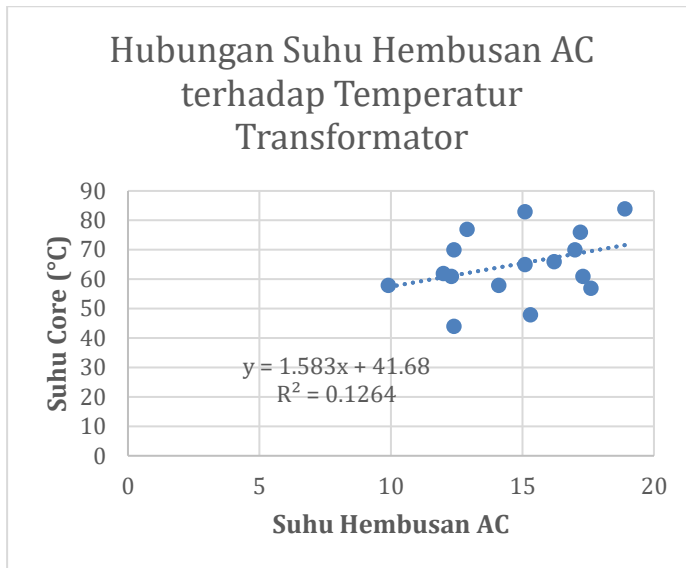
Berdasarkan grafik *scatter plot* pada Gambar di atas, diperoleh persamaan regresi linear untuk hubungan antara suhu ruang trafo terhadap suhu *core* transformator sebagai berikut:

$$y = 6.0x - 102.5$$

dengan nilai Koefisien Determinasi (R^2) sebesar **0,3** (atau **32,1%**). Nilai ini menunjukkan bahwa variasi perubahan temperatur ruangan memberikan kontribusi sebesar 32,1% terhadap naik-turunnya suhu *core* transformator secara langsung.

Secara visual, grafik menunjukkan **tren positif (garis linear naik ke kanan)**. Hal ini mengindikasikan bahwa setiap terjadi kenaikan suhu pada ruangan trafo, maka akan diikuti dengan kenaikan suhu *core* secara linear. Pengaruh suhu ruangan yang mencapai hampir 32,1% ini membuktikan bahwa kondisi termal lingkungan di area penempatan trafo memegang peranan penting terhadap penyerapan panas pada komponen internal transformator.

Adapun sisa pengaruh sebesar 67,9% lainnya disebabkan oleh faktor internal di luar suhu ruangan, seperti fluktuasi pembebanan arus pada trafo, rugi-rugi tembaga/inti, serta kinerja dari sistem kipas pendingin (*cooling fan*) internal transformator itu sendiri.



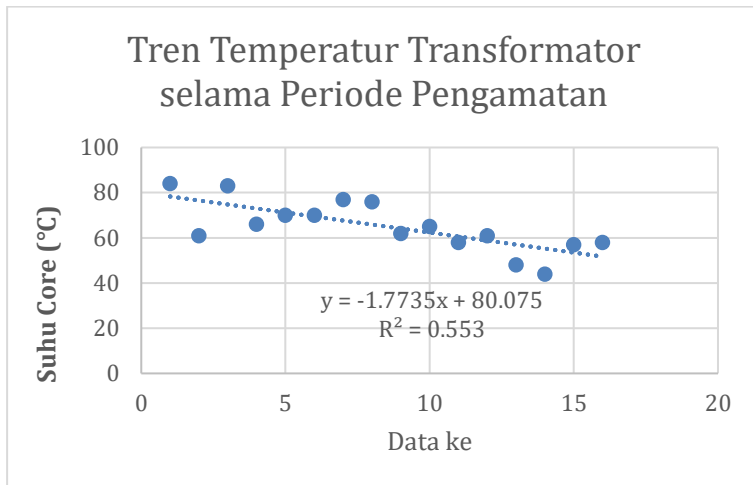
Berdasarkan grafik *scatter plot* pada Gambar di atas, diperoleh persamaan regresi linear yang menghubungkan pengaruh suhu hembusan pendingin udara (AC) terhadap suhu *core* transformator sebagai berikut:

$$y = 1.5x + 41.6$$

dengan nilai Koefisien Determinasi (R^2) sebesar **0,1** (atau **12,6%**). Nilai ini menunjukkan bahwa variasi suhu dari hembusan AC secara langsung memberikan kontribusi sebesar 12,64% terhadap naik-turunnya suhu *core* pada transformator kering.

Grafik di atas menunjukkan adanya **tren positif (arah garis linear naik ke kanan)**. Hal ini menandakan bahwa semakin tinggi suhu hembusan udara AC yang keluar (kurang dingin), maka suhu *core* transformator cenderung ikut mengalami kenaikan secara linear.

Meskipun nilai kontribusi langsungnya sebesar 12,6% (kategori korelasi rendah), parameter ini tetap menjadi indikator penting dalam menjaga performa pendinginan luar transformator. Rendahnya persentase pengaruh langsung ini dikarenakan perpindahan panas dari hembusan udara AC ke dalam inti besi (*core*) harus melalui media udara ruangan terlebih dahulu serta melewati dinding penutup (*enclosure*) luar transformator. Sisa pengaruh sebesar 87,3% dipengaruhi oleh kombinasi faktor internal seperti pembebanan arus listrik, rugi-rugi besi/tembaga trafo, kondisi suhu lingkungan ruangan secara menyeluruh, serta keandalan sirkulasi dari *cooling fan* bawaan unit transformator.



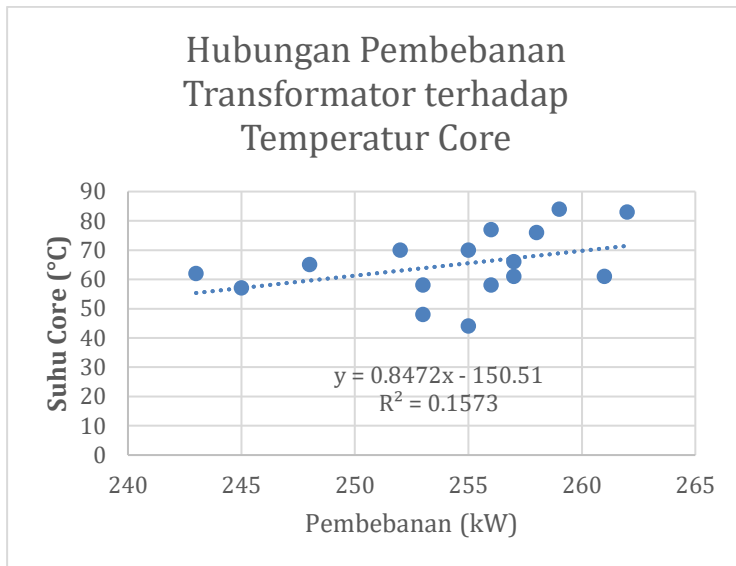
Berdasarkan grafik *scatter plot* pada Gambar di atas, diperoleh persamaan regresi linear yang menunjukkan kecenderungan perubahan suhu *core* transformator berdasarkan urutan data atau waktu pengamatan sebagai berikut:

$$y = -1.7x + 80.0$$

dengan nilai Koefisien Determinasi (R^2) sebesar **0,5** (atau **55,3%**). Nilai ini menunjukkan bahwa faktor waktu atau urutan pengambilan data secara kronologis memiliki kontribusi sebesar 55,3% terhadap perubahan fluktuasi penurunan suhu *core* transformator.

Berbeda dengan grafik-grafik sebelumnya, grafik ini menunjukkan **tren negatif yang cukup kuat (arah garis linear miring turun ke kanan)** karena nilai gradiennya bernilai minus (-1,7). Hal ini menandakan bahwa seiring berjalannya periode pengamatan dari data pertama hingga data ke-16, temperatur pada komponen *core* transformator secara umum mengalami penurunan yang konsisten dan gradual.

Penurunan tren suhu sebesar 55,3% ini mengindikasikan bahwa kondisi termal transformator berhasil dikendalikan dengan baik selama rentang waktu penelitian dilakukan. Efektivitas pendinginan lingkungan ataupun stabilisasi pembebanan di area desulfurisasi berkontribusi besar dalam menjaga agar temperatur operasional inti besi tidak mengalami *overheating*, melainkan bergerak turun menuju kondisi yang lebih stabil dan aman bagi keandalan sistem isolasi transformator. Sementara itu, sisa pengaruh sebesar 44,7% fluktuasi data dipengaruhi oleh variasi kondisi eksternal operasional harian yang dinamis pada saat setiap pengambilan sampel dilakukan.



Berdasarkan grafik *scatter plot* pada Gambar di atas, diperoleh persamaan regresi linear yang menghubungkan pengaruh pembebanan beban aktif (kW) terhadap kenaikan suhu *core* transformator sebagai berikut:

$$y = 0.8x - 150.5$$

dengan nilai Koefisien Determinasi (R^2) sebesar **0,1** (atau **15,7%**). Nilai ini menunjukkan bahwa variasi besarnya pembebanan hanya berkontribusi sebesar 15,7% terhadap perubahan atau fluktuasi suhu *core* pada transformator.

Secara visual, grafik menunjukkan **tren positif (arah garis linear naik ke kanan)** dengan nilai gradien positif (+0,8). Hal ini mengindikasikan bahwa setiap kenaikan beban operasional (dalam kW) secara linear akan diikuti oleh peningkatan temperatur pada komponen *core* akibat adanya rugi-rugi tembaga dan besi yang menghasilkan panas disipasi.

Meskipun arah trennya sudah sesuai dengan teori kelistrikan, nilai kontribusi langsung yang relatif rendah (15,7%) ini dipengaruhi oleh kondisi pembebanan aktual transformator di lapangan yang cenderung konstan dan stabil pada interval beban menengah bawah (berkisar antara 243 kW hingga 262 kW). Karena tidak adanya lonjakan beban yang ekstrem selama periode observasi, dinamika suhu internal *core* tidak berfluktuasi secara tajam akibat arus. Sisa pengaruh yang dominan sebesar 84,2% disebabkan oleh faktor eksternal lain, seperti kondisi

temperatur ruangan penempatan, efektivitas hembusan udara pendingin lingkungan, serta kinerja operasional sistem kipas (*cooling fan*) internal transformator.

4.1.2 Kondisi Pembebanan Transformator

Pengaruh besarnya arus beban terhadap kenaikan suhu operasional transformator diamati secara berkala pada shift pagi, sore, dan malam. Rincian data pembebanan beserta respons temperaturnya disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Data Pembebanan transformator dan perubahan suhu operasional

No	Tanggal	Waktu	Set Point AC (°C)	Suhu Hembusan AC	P IN (KW)	Q IN (kVAr)	P OUT (KW)	Q OUT (kVAr)	Beban %	Status Fan
1	5/2/2026	16:00	25	18,9	269	136	259	102	43,4	OFF
2	5/2/2026	0:00	25	17,3	271	137	261	104	44,6	OFF
3	8/2/2026	0:00	19	15,1	269	137	262	104	44,8	OFF
4	8/2/2026	8:00	19	16,2	267	137	257	105	44,1	OFF
5	11/2/2026	8:00	27	17,0	255	102	255	102	43,7	ON
6	11/2/2026	16:00	27	12,4	259	131	252	102	44,2	ON
7	14/2/2026	16:00	26	12,9	266	133	256	102	43,8	ON
8	14/2/2026	0:00	26	17,2	265	134	258	102	43,4	ON
9	17/2/2026	8:00	16	12,0	249	134	243	98	41,6	ON
10	17/2/2026	16:00	16	15,1	251	131	248	101	42,5	ON
11	20/2/2026	16:00	17	14,1	266	135	256	100	43,7	ON
12	20/2/2026	0:00	17	12,3	264	134	257	102	44,0	ON
13	23/2/2026	0:00	18	15,3	265	133	253	99	43,3	ON
14	23/2/2026	8:00	18	12,4	264	133	255	99	43,5	ON
15	26/2/2026	8:00	23	17,6	236	131	245	98	41,9	ON
16	26/2/2026	16:00	23	9,9	250	131	253	101	43,2	ON

Tabel 9. Data Pembebanan transformator dan perubahan suhu operasional (Lanjutan)

Tabel 9 menunjukkan bahwa variasi arus beban fasa berada dalam kondisi relatif stabil sepanjang waktu pengamatan. Kenaikan suhu operasional yang

terjadi tidak hanya dipengaruhi oleh arus pembebanan, tetapi juga sangat bergantung pada kestabilan temperatur ruangan yang dikondisikan oleh sistem AC.

Data hasil pengukuran parameter daya masuk (*incoming*), daya keluar (*outgoing*), serta persentase faktor pembebanan (*loading*) transformator kering selama periode pengamatan bulan Februari 2026 disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Pembebanan

No	Tanggal	Waktu	P IN (kW)	Q IN (kVAr)	S IN (kVA)	P OUT (kW)	Q OUT (kvar)	S OUT (kVA)	loading
1	5/2/2026	16:00	269	136	302	259	102	277	47,9%
2	5/2/2026	0:00	271	137	304	261	104	281	48,2%
3	8/2/2026	0:00	269	137	301	262	104	282	47,7%
4	8/2/2026	8:00	267	137	300	257	105	278	47,6%
5	11/2/2026	8:00	255	102	295	255	102	275	46,8%
6	11/2/2026	16:00	259	131	290	252	102	272	46,0%
7	14/2/2026	16:00	266	133	298	256	102	276	47,3%
8	14/2/2026	0:00	265	134	297	258	102	277	47,1%
9	17/2/2026	8:00	249	134	283	243	98	262	44,9%
10	17/2/2026	16:00	251	131	284	248	101	268	45,0%
11	20/2/2026	16:00	266	135	299	256	100	275	47,4%
12	20/2/2026	0:00	264	134	297	257	102	277	47,1%
13	23/2/2026	0:00	265	133	297	253	99	273	47,1%
14	23/2/2026	8:00	264	133	296	255	99	274	46,9%
15	26/2/2026	8:00	236	131	270	245	98	264	42,8%
16	26/2/2026	16:00	250	131	282	253	101	272	44,7%

Berdasarkan data pada Tabel 4.X, hasil pemantauan menunjukkan bahwa profil pembebanan (*loading*) transformator berada dalam kondisi yang relatif stabil dan aman. Persentase pembebanan tertinggi tercatat sebesar **48,2%** pada tanggal 5 Februari 2026 pukul 00:00 WIB dengan daya nampak masuk (S) IN sebesar 304,0 kVA. Sedangkan pembebanan terendah tercatat sebesar 42,8% pada tanggal 26 Februari 2026 pukul 08:00 WIB dengan daya nampak masuk (S)IN sebesar 270,0 kVA.

Secara keseluruhan, rata-rata persentase pembebanan operasional transformator berada pada kisaran 42,8% hingga 48,2% dari kapasitas nominalnya (630 kVA). Nilai ini menunjukkan bahwa transformator beroperasi pada tingkat beban sedang (di bawah 50%), sehingga potensi timbulnya panas berlebih akibat rugi-rugi tembaga (I^2R) dapat diminimalisasi dan keandalan isolasi tetap terjaga baik.

4.2 Hubungan Temperatur Ruang terhadap Temperatur Transformator

Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan rumus yang telah dijelaskan pada BAB II, yaitu rumus pembebanan transformator dan suhu hotspot.

4.2.1 Perhitungan Faktor Pembebanan Transformator

Perhitungan pembebanan transformator menggunakan rumus (2.6.1):

$$K = \frac{S_{aktual}}{S_{nominal}} \quad (4.1)$$

Keterangan:

K = Faktor beban atau rasio pembebanan.

S_{aktual} = Beban aktual terukur (kVA).

$S_{nominal}$ = Kapasitas daya nominal transformator (kVA).

$S_{aktual} = 277 \text{ kVA}$

$S_{nominal} = 630 \text{ kVA}$

$$K = \frac{277 \text{ kVA}}{630 \text{ kVA}}$$

$$K = 0,4$$

Hasil:

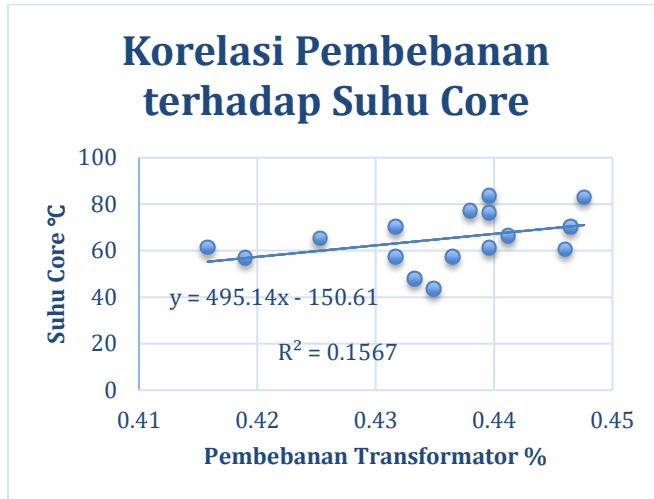
Nilai faktor pembebanan transformator adalah 0,4 atau 43,9%

Hasil kalkulasi persentase faktor pembebanan (K) terhadap kapasitas nominal nominal 630 kVA selama siklus pengamatan disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11. Data Hasil Perhitungan Faktor Pembebanan Transformator

No	S aktual (kVA)	S nominal (kVA)	Faktor Pembebanan (K)	Persentase (%)
1	277	630	0,4	43,9%
2	281	630	0,4	44,6%
3	282	630	0,4	44,7%
4	278	630	0,4	44,1%
5	275	630	0,4	43,6%
6	272	630	0,4	43,1%
7	276	630	0,4	43,8%
8	277	630	0,4	43,9%
9	262	630	0,4	41,5%
10	268	630	0,4	42,5%
11	275	630	0,4	43,6%
12	277	630	0,4	43,9%
13	273	630	0,4	43,3%
14	274	630	0,4	43,4%
15	264	630	0,4	41,9%
16	272	630	0,4	43,1%

Berdasarkan Tabel 11. persentase pembebanan transformator berada pada kisaran 41,5% hingga 44,7% dari kapasitas nominalnya. Pembebanan yang tergolong rendah ini (di bawah 50%) menjelaskan mengapa pembangkitan panas internal akibat rugi-rugi tembaga tidak terlampaui tinggi.



Berdasarkan hasil pengolahan data pada grafik *Scatter Plot* , diperoleh persamaan regresi $y = 495.1x - 150.6$ dengan nilai Koefisien Determinasi sebesar 0,1. Nilai ini menunjukkan bahwa variasi pembebanan hanya berkontribusi sebesar 15,6% terhadap perubahan suhu *core* transformator. Rendahnya nilai korelasi ini disebabkan oleh kondisi pembebanan saat pengambilan data yang cenderung stabil pada rentang 41,5% hingga 44,7%. Secara teknis, hal ini mengindikasikan bahwa pada beban rendah hingga menengah yang stabil, fluktuasi suhu tidak didominasi oleh arus beban, melainkan oleh faktor lain seperti sistem pendingin.

4.2.2 Perhitungan Titik Panas Transformator

Perhitungan suhu hotspot menggunakan rumus (2.6.3)

$$\theta_{hs} = \theta_a + \Delta\theta_{hs} \quad (4.2)$$

Keterangan:

θ_{hs} = Suhu titik panas atau *hotspot* (°C)

θ_a = Suhu ambien ruangan yang dikontrol oleh sistem pendingin (°C)

$\Delta\theta_{hs}$ = Kenaikan suhu titik panas akibat pembebanan (°C)

$$\theta_{hs} = 83,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_a = 28,8^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\theta_{hs} = \theta_{hs} - \theta_a$$

$$\Delta\theta_{hs} = 83,8^{\circ}\text{C} - 28,8^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\theta_{hs} = 55,0^{\circ}\text{C}$$

Hasil:

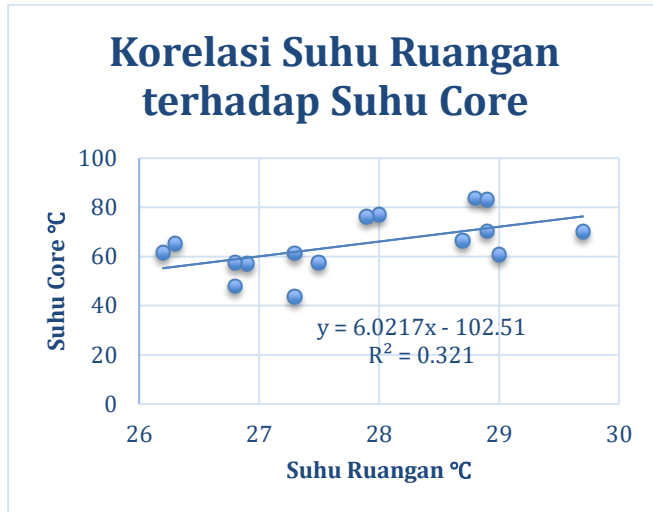
Kenaikan suhu hotspot trafo adalah sebesar 55,0 ($^{\circ}\text{C}$)

Nilai estimasi temperatur titik panas (*hotspot*) yang diperoleh dari hasil pengukuran dan kalkulasi kenaikan suhu disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12. Data Hasil Perhitungan Titik Panas Transformator

No	Waktu	Suhu HOTSPOT (θ_{hs}) $^{\circ}\text{C}$	Suhu ambien (θ_a) $^{\circ}\text{C}$	Kenaikan Suhu ($\Delta\theta_{hs}$) $^{\circ}\text{C}$
1	Data 1	83,8	28,8	55,0
2	Data 2	60,6	29,0	31,6
3	Data 3	83,1	28,9	54,2
4	Data 4	66,4	28,7	37,7
5	Data 5	70,3	28,9	41,4
6	Data 6	70,2	29,7	40,5
7	Data 7	77,1	28,0	49,1
8	Data 8	76,3	27,9	48,4
9	Data 9	61,5	26,2	35,3
10	Data 10	65,3	26,3	39,0
11	Data 11	57,5	27,5	30,0
12	Data 12	61,3	27,3	34,0
13	Data 13	48,0	26,8	21,2
14	Data 14	43,6	27,3	16,3
15	Data 15	57,0	26,9	30,1
16	Data 16	57,5	26,8	30,7

Tabel 12 memperlihatkan bahwa suhu *hotspot* tertinggi tercatat sebesar 55°C. Nilai ini masih berada jauh di bawah batas toleransi termal kelas isolasi F (155°C) maupun batas *alarm* sistem proteksi (130°C), sehingga kinerja isolasi transformator dipastikan aman.



Berdasarkan hasil data pada grafik korelasi suhu ruangan diperoleh persamaan regresi linier $y = 6.0x - 102.5$ dengan nilai Koefisien Determinasi (R^2) sebesar 0,3. Nilai ini menunjukkan bahwa suhu ruangan berkontribusi sebesar 32,1% terhadap perubahan suhu *core* transformator.

Meskipun nilai korelasi ini berada dalam kategori rendah hingga sedang, terdapat tren positif yang menunjukkan bahwa kenaikan suhu lingkungan cenderung diikuti oleh kenaikan suhu pada komponen internal transformator. Namun, karena nilai R^2 hanya sebesar 32,1%, dapat disimpulkan bahwa mayoritas pengaruh terhadap suhu *core* (sekitar 67,9%) masih didominasi oleh variabel lain di luar suhu lingkungan, yaitu operasional sistem kipas pendingin (*cooling fan*) dan rugi-rugi internal akibat beban.

Selama periode observasi, suhu ruangan terjaga pada rentang 26,2°C hingga 29,7°C. Konsistensi suhu ruangan yang berada di bawah ambang batas 40°C (sesuai standar buku operasional perusahaan) menjadi faktor kunci yang memastikan transformator tidak mengalami *overheating* ekstrem, meskipun

sistem pendingin otomatis baru bekerja secara penuh ketika suhu mulai mendekati parameter batas atas yang ditetapkan.

4.3 Hubungan Pembebanan terhadap Temperatur Transformator dan Rugi-rugi

Setelah dilakukan perhitungan pembebanan transformator dan suhu hotspot berdasarkan rumus yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya, maka diperoleh hasil perhitungan untuk seluruh data pengamatan. Hasil tersebut disajikan dalam bentuk Tabel untuk memudahkan proses analisis lebih lanjut.

Ringkasan hubungan antara faktor pembebanan (K) dan nilai kenaikan suhu (*temperature rise*) komponen internal transformator disajikan pada Tabel 13.

Tabel 13. Data Hasil Perhitungan Faktor Beban dan Kenaikan Suhu Transformator

No	Kondisi	S (kVA)	K	Beban %	θ_a °C	θ_{hs} °C	$\Delta\theta_{hs}$ °C
1	Masuk	277	0,4	43,3	28,8	83,8	55,0
2	Pulang	281	0,4	44,6	29,0	60,6	31,6
3	Masuk	282	0,4	44,7	28,9	83,1	54,2
4	Pulang	278	0,4	44,1	28,7	66,4	37,7
5	Masuk	275	0,4	43,6	28,9	70,3	41,4
6	Pulang	272	0,4	44,1	29,7	70,2	40,5
7	Masuk	276	0,4	43,8	28,0	77,1	49,1
8	Pulang	277	0,4	43,3	27,9	76,3	48,8
9	Masuk	262	0,4	41,5	26,2	61,5	35,3
10	Pulang	268	0,4	42,5	26,3	65,3	39,0
11	Masuk	275	0,4	43,6	27,5	57,5	30,0
12	Pulang	277	0,4	43,9	27,3	61,3	34,0
13	Masuk	273	0,4	43,3	26,8	48,0	21,2
14	Pulang	274	0,4	43,4	27,3	43,6	16,3
15	Masuk	264	0,4	41,9	26,9	57,0	30,1
16	Pulang	272	0,4	43,1	26,8	57,5	30,7

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan menggunakan rumus faktor pembebanan dan suhu hotspot, diperoleh data seperti yang ditunjukkan pada Tabel 13.

Dari Tabel tersebut, nilai daya semu aktual S berada pada jarak 262 kVA sampai 282 kVA. Dengan kapasitas nominal transformator sebesar 630 kVA, maka diperoleh nilai faktor pembebanan (K) pada kisaran 41,5% hingga 44,7%. Selain itu, suhu ruangan selama pengambilan data berada pada rentang 26,2°C sampai 29,7°C. Sementara itu, suhu titik panas transformator atau suhu hotspot berada pada kisaran 43,6°C sampai 83,8°C. Berdasarkan hasil tersebut, dapat dilihat bahwa pembebanan trafo cenderung relatif stabil, sedangkan suhu operasional trafo menunjukkan variasi yang cukup signifikan pada setiap waktu pengamatan.

4.4 Evaluasi Kinerja Operasional Transformator Berdasarkan Termal

Berdasarkan data hasil pengamatan, suhu ruangan selama penelitian berada pada rentang 26,2°C sampai 29,7°C. Nilai ini menunjukkan bahwa kondisi ruangan relatif stabil dan masih berada dalam rentang kerja sistem pendingin. Jika dibandingkan dengan suhu transformator titik panas dan suhu inti, terlihat bahwa ketika suhu ruangan mengalami kenaikan, suhu transformator juga cenderung meningkat. Sebaliknya, pada kondisi suhu ruangan yang lebih rendah, suhu transformator menunjukkan nilai yang lebih stabil.

Hal ini menunjukkan bahwa sistem pendingin ruangan berpengaruh terhadap suhu operasional transformator. Sistem AC membantu menjaga suhu lingkungan transformator sekitar agar panas yang dihasilkan selama operasi tidak terakumulasi secara berlebihan. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa sistem pendingin ruangan memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan suhu operasional transformator kering.

Merujuk pada standar IEC 60076-11 untuk transformator tipe kering (dry-type) dengan kelas isolasi F (155°C), batas pengoperasian termal dijaga ketat demi mencegah degradasi isolasi resin. Berdasarkan data pengukuran aktual di lapangan, temperatur tertinggi yang terukur pada belitan transformator di area desulfurisasi masih berada jauh di bawah batas suhu alarm (130°C) maupun batas suhu trip (150°C). Margin termal yang lebar ini menunjukkan bahwa transformator beroperasi pada kondisi yang sangat aman. Melalui pengkondisian udara ruangan secara kontinu dan bantuan sirkulasi udara dari kipas internal (fan), keandalan isolasi transformator dapat dipertahankan secara optimal sesuai usia paksa desainnya.

4.5 Analisis Peran Kipas Internal dan Sistem Perlindungan

Berdasarkan referensi dari buku operasional perusahaan, transformator kering memiliki batas suhu lingkungan maksimum sekitar 40°C. apabila suhu 100°C kipas akan bekerja secara otomatis dan ketika suhu belitan lebih rendah dari 80°C pengoperasian kipas akan dihentikan secara otomatis. Selain itu, sistem proteksi transformator akan memberikan alarm apabila suhu belitan mencapai 130°C, dan akan mengalami trip otomatis apabila suhu mencapai 150°C.

Jika dibandingkan dengan hasil pengukuran pada penelitian ini, suhu ruangan berada pada kisaran 26,2°C hingga 29,7°C, sehingga masih berada jauh di bawah batas maksimum yang diizinkan. Sementara itu, suhu transformator yang terukur berada pada kisaran 43,6°C hingga 83,8°C, yang masih berada di bawah batas alarm.

Hal ini menunjukkan bahwa transformator masih beroperasi dalam kondisi aman dan sistem pendingin ruangan bekerja dengan baik dalam menjaga kestabilan suhu operasional.

4.6 Analisis Hubungan Variasi Beban terhadap Perubahan Suhu

Berdasarkan Tabel hasil perhitungan dan grafik yang telah disajikan, nilai pembebanan transformator berada pada kisaran 41,5% hingga 44.7%.

Meskipun variasi beban relatif kecil, suhu operasional transformator menunjukkan perubahan yang cukup signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat hubungan antara pembebanan dengan perubahan suhu transformator. Secara umum, peningkatan pembebanan akan menyebabkan kenaikan suhu pada transformator, baik pada suhu titik panas maupun suhu inti. Namun pada penelitian ini, perubahan suhu juga dipengaruhi oleh faktor lain seperti suhu ruangan dan lama waktu pengoperasian. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa variasi pembebanan memiliki hubungan terhadap perubahan suhu operasional transformator.

Bab 5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakteristik operasi *dry-type transformer* di area desulfurisasi berada pada kondisi aman dan stabil di bawah ambang batas termal, dengan temperatur belitan terjaga jauh di bawah batas alarm 130°C dan batas *trip* 150°C pada rentang pembebanan yang stabil sebesar 41% hingga 44%.
2. Terdapat hubungan positif yang moderat antara kondisi sistem pendingin ruangan (*ambient*) dengan temperatur belitan transformator dengan kontribusi sebesar $R^2 = 0,3$ atau (32,1 % di mana pengkondisian suhu udara ruangan serta pengoperasian kipas internal (*fan*) memegang peran krusial sebagai pembuang panas utama.
3. Terdapat kecenderungan pengaruh yang relatif rendah antara fluktuasi pembebanan terhadap kenaikan temperatur belitan transformator dengan kontribusi hanya sebesar $R^2 = 0,1$ atau 15,6%. Hal ini menunjukkan bahwa pengelolaan sistem pendingin jauh lebih dominan dalam memengaruhi suhu operasional transformator dibandingkan variasi beban aktual yang konstan dan rendah.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, penulis menyampaikan beberapa saran yang diharapkan dapat bermanfaat bagi perusahaan:

1. Optimalisasi Sistem Pendingin Ruangan (AC): Mengingat suhu ruangan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap suhu operasional transformator, disarankan untuk melakukan perawatan rutin pada unit AC secara berkala (cleaning filter dan pengecekan tekanan freon) guna memastikan suhu ruangan tetap terjaga di bawah 30°C.
2. Pemeriksaan Kinerja Kipas Internal (Internal Fans): Meskipun saat ini kipas belum bekerja secara maksimal karena suhu masih di bawah *setting point*, perlu dilakukan pengujian fungsi (*function test*) secara periodik untuk memastikan kipas tetap dalam kondisi siap beroperasi jika terjadi lonjakan beban di masa mendatang.
3. Pemanfaatan Data Termal untuk Prediksi: Disarankan kepada departemen pemeliharaan untuk melakukan pendataan suhu

menggunakan *thermal gun* secara konsisten seperti yang telah dilakukan dalam penelitian ini, guna membangun pola data yang dapat memprediksi potensi *overheating* sebelum alarm sistem berbunyi.

4. Evaluasi Kapasitas Beban: Karena beban operasional saat ini masih berada di kisaran 41%–45%, perusahaan dapat mempertimbangkan penambahan beban secara bertahap jika diperlukan, dengan catatan tetap memantau kenaikan suhu kumparan agar tidak melampaui batas *temperature rise* yang diizinkan (80 K).
5. Pembersihan Debu pada Body Transformator: Disarankan untuk melakukan pembersihan rutin pada bagian luar dan celah-celah *dry-type transformer* dari penumpukan debu, karena debu yang tebal dapat menghambat pelepasan panas alami ke udara ruangan.
6. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan melakukan pengamatan dengan periode yang lebih panjang guna mengidentifikasi karakteristik termal transformator pada berbagai variasi cuaca ekstrem musiman, serta melakukan analisis pada kondisi pembebanan yang lebih tinggi (mendekati kapasitas nominal >50%) untuk memvalidasi model hubungan termal secara lebih komprehensif.

Daftar Pustaka

- [1] R. A. Adami, C. G. Irianto, T. K. Sari, and I. Kasim, "ANALISIS PENGARUH BEBAN TERHADAP EFISIENSI DAN SUSUT UMUR TRANSFORMATOR KERING 630 KVA DI MODA RAYA TERPADU JAKARTA," *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 26, no. 4, pp. 185–191, Nov. 2024, doi: 10.14710/transmisi.26.4.185-191.
- [2] Y. Li, A. Zhang, J. Huang, and Z. Xu, "An Approach Based on Transfer Learning to Lifetime Degradation Rate Prediction of the Dry-Type Transformer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 2, pp. 1811–1819, 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3156039.
- [3] B. Esenboga and T. Demirdelen, "Efficiency and Cost Based Multi-optimization and Thermal/Electromagnetic Analyses of 3-Phase Dry-Type Transformer," *IETE J. Res.*, vol. 68, no. 4, pp. 2885–2897, 2022, doi: 10.1080/03772063.2020.1732841.
- [4] B. Doan Thanh, "CALCULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION OF AIR-COOLED THREE-PHASE DRY TRANSFORMER TÍNH TOÁN PHÂN BỐ NHIỆT MÁY BIẾN ÁP KHÔNG BA PHA LÀM MÁT BẰNG KHÔNG KHÍ."
- [5] S. Yuan *et al.*, "Modeling Method for Thermal Field of Turbulent Cooling Dry-Type On-Board Traction Transformer in EMUs," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 1, pp. 298–311, 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3097876.
- [6] H. M. Khristiana, S. Soeparman, S. Wahyudi, and R. N. Hasanah, "Analysis Of Loss On Single-Phase Dry Transformers With Non-Linear Load," *Eastern-European*

- Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5, no. 8–113, pp. 17–22, 2021, doi: 10.15587/1729-4061.2021.240233.
- [7] G. Xu *et al.*, “Analysis of Hot Spot Temperature of Dry-Type Transformer Based on Finite Element Method,” *2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia, I and CPS Asia 2020*, pp. 449–453, 2020, doi: 10.1109/ICPSAsia48933.2020.9208365.
 - [8] “Comparison between amorphous alloy solid core dry transformer and silicon steel solid core d”.
 - [9] P. Kumar and P. Verma, “Review Paper on Diagnostics Study of Dry Transformer.”
 - [10] Y. Sun *et al.*, “Hotspot temperature prediction of dry-type transformers based on particle filter optimization with support vector regression,” *Symmetry (Basel)*, vol. 13, no. 8, 2021, doi: 10.3390/sym13081320.
 - [11] D. Azizian and M. Bigdeli, “A new cast-resin transformer thermal model based on recurrent neural networks,” *Archives of Electrical Engineering*, vol. 66, no. 1, pp. 17–28, Mar. 2017, doi: 10.1515/aee-2017-0002.
 - [12] “mrizal1,+277.+JURNLA+JRPP+BASIL”.
 - [13] S. Barseghyan, A. Hayrapetyan, and A. Kirakosyan, “Ecological assessment of noise impact of dry transformer substations on the environment,” in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Jun. 2021. doi: 10.1051/e3sconf/202126502011.
 - [14] J. Sosial, D. Teknologi, N. Taran, and R. Sinambela, “Diagnostik Dry Power Transformer Berusia di Atas 25 Tahun untuk Mengetahui Kondisi Terkini dan Rekomendasinya,” *Jurnal Sosial dan Teknologi (SOSTECH)*, vol. 5, no. 5, 2025.
 - [15] Winda Arista, Siti Anisah, and Pristisal Wibowo, “Analisis Kinerja Trafo Distribusi pada ULP Medan Kota dan Penanggulangannya dengan Sisip Trafo,” *JURAL RISET RUMPUN ILMU TEKNIK*, vol. 5, no. 1, pp. 196–211, Jan. 2026, doi: 10.55606/jurritek.v5i1.7402.
 - [16] Y. Huang, *PLTU - PT. Bintang Alumina Indonesia: Standar Operasional Prosedur Operasional Listrik*, Edisi A/1. Bintan: Indonesia Bintang Alumina Co., Ltd., 2023.

Biodata



Nama : Akmal Ramadan
TTL : Batam, 24-11-2001
Agama : Islam
Alamat : Puri sasmaya RT 002 RW 013 kel
sambau kec Nongsa
Email : Akmalmadhan222@gmail.com
Riwayat Pendidikan : SMA/SMK : SMK 7 N BATAM
SMP : SMP 43 N BATAM

Lampiran

Data Tugas Akhir : <https://bit.ly/4dkXctc>

Data Lapangan : <https://bit.ly/4tnluqk>