

Pengaruh Pembebanan Terhadap *Life-Time* Transformator Distribusi 50 kV Pada Penyulang LMS01 Kelurahan Tambakreja ULP Cilacap Kota

Wim Biandi Bagas Saputra¹, Kholistianingsih^{2,*}, Isra' Nuur Darmawan³, Irawan Dharma Sukowati⁴

^{1,2,3,4,*}Program Studi Teknik Elektro, niversitas Wijayakusuma Purwokerto, Indonesia

Article Info	ABSTRACT
Article history: Received: 2 Desember 2025 Received in revised form: 15 Desember 2025 Accepted: 25 Desember 2025 Available online: 30 Desember 2025	THE EFFECT OF LOADING ON THE LIFETIME OF A 50 KV DISTRIBUTION TRANSFORMER ON THE LMS01 FEEDER IN TAMBAKREJA VILLAGE, ULP CILACAP CITY. <i>This Study Aims To Analyze The Effect Of Loading On The Life-Time Of A 50 Kv Distribution Transformer at Penyulang LMS01, Tambakreja Village, ULP Cilacap Kota. Distribution transformers are critical components in power systems, and overloading can accelerate performance degradation and reduce their lifespan. The research method involves measuring current, voltage, and load power of a B&D transformer from 2019 to 2023. The analysis reveals that excessive loading, especially during nighttime, reduces the transformer's lifespan by 8 years and 9 months from the standard 20 years, with an error value of 44,25%. The remaining lifespan is estimated at only 11 years and 3 months. This study recommends regular monitoring and limiting loads to below 80% capacity to extend the transformer's operational life</i>
Keywords: Distribution transformer Loading Lifetime PLN Thermal analysis	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pembebanan terhadap umur pakai (life-time) transformator distribusi 50 kV pada Penyulang LMS01 Kelurahan Tambakreja ULP Cilacap Kota. Transformator distribusi merupakan komponen vital dalam sistem tenaga listrik, dan pembebanan berlebih dapat mempercepat penurunan kinerja serta umur pakainya. Metode penelitian meliputi pengukuran arus, tegangan, dan daya beban transformator merk B&D selama periode 2019-2023. Hasil analisis menunjukkan bahwa pembebanan berlebih, terutama pada malam hari, menyebabkan penurunan umur pakai transformator hingga 8 tahun 9 bulan dari standar 20 tahun, dengan nilai error sebesar 44,25%. Sisa umur pakai transformator diperkirakan hanya 11 tahun 3 bulan. Penelitian ini merekomendasikan pemantauan berkala dan pembatasan beban di bawah 80% kapasitas untuk memperpanjang masa pakai transformator.
Kata Kunci: Transformator distribusi Pembebanan Umur pakai PLN Analisis thermal	
Corresponding author: Kholistianingsih Program Studi Teknik Elektro Universitas Wijayakusuma Purwokerto Jalan Beji Karangsalam, Kecamatan Kedungbanteng, Banyumas, Jawa Tengah, 53152, Indonesia. E-mail addresses: kholistianingsih@gmail.ac.id	

1. Pendahuluan

Gardu distribusi adalah komponen krusial dalam sistem tenaga listrik yang menghubungkan jaringan besar dengan pelanggan, dilengkapi dengan PHB-TM (Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah), transformator distribusi, dan PHB-TR (Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah) [1], [2]. Transformator merupakan inti gardu, berfungsi mengubah tegangan listrik untuk distribusi yang efisien. Agar transformator berfungsi optimal sepanjang masa pakainya, pemilihan jenis dan penempatan yang tepat berdasarkan beban (kVA), serta perawatan berkala yang komprehensif sangatlah penting [1], [3]. Dengan menganalisis data tegangan dan arus harian, usia pakai transformator dapat diprediksi, memungkinkan penggantian dini untuk mencegah gangguan pasokan listrik dan kerugian operasional.

Gangguan pada transformator dapat bersifat internal (kerusakan dari dalam) atau eksternal (faktor luar), dengan beban lebih (*overload*) menjadi salah satu penyebab eksternal yang paling merusak. Ketika transformator beroperasi mendekati atau melebihi kapasitas desainnya secara terus-menerus, terjadi peningkatan suhu operasional yang signifikan [4], [5]. Suhu ekstrem ini merusak material isolasi internal, mempercepat proses penuaan (*aging*), dan secara drastis memperpendek umur transformator [4], [5], [6]. Bahkan, kenaikan suhu operasional sebesar 6-8°C di atas batas normal dapat memotong umur transformator hingga separuhnya [4], [7], [8]. Selain itu, beban tidak seimbang (*unbalanced load*) juga menyebabkan *overheating* lokal dan degradasi isolasi yang tidak merata [4], [9].

Efisiensi penyaluran listrik kepada konsumen sangat bergantung pada perhitungan yang akurat dan pengelolaan transformator distribusi yang optimal. Transformator distribusi merupakan komponen yang sangat krusial dalam sistem tenaga listrik, dan keandalan serta umur pakainya dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satunya adalah pemilihan kapasitas kVA transformator yang sesuai dengan beban yang dilayani [10]. Meskipun efisiensi ideal adalah 100%, transformator tidak dapat mencapai efisiensi sempurna karena adanya rugi-rugi inti, seperti histeresis dan rugi-rugi arus eddy, yang menurunkan efisiensi hingga di bawah 100%. Kerugian-kerugian ini kemudian diubah menjadi panas, panas berlebih ini dapat mempercepat pembentukan karbon dalam minyak isolasi transformator, yang pada gilirannya akan menurunkan tingkat isolasinya [11].

Banyak faktor yang dapat memengaruhi kondisi transformator distribusi. Beban berlebih merupakan penyebab umum kerusakan atau penurunan umur transformator karena meningkatkan suhu operasionalnya, yang mempercepat degradasi material transformator dan proses penuaan [10], [12]. Suhu belitan primer dan sekunder transformator

dipengaruhi langsung oleh beban nominal. Dalam pengujian, beban nominal ini digunakan untuk menentukan ketahanan panas transformator dan menghitung suhu belitan. Beban maksimal pada transformator daya mengacu pada penambahan beban yang melebihi kapasitas nominal yang tertera pada nameplate. Meskipun ada batasan beban nominal kontinu pada suhu standar, transformator daya masih dapat diberi beban lebih sekitar 5% hingga 10% dari kapasitas nominalnya, sesuai dengan standar IEC 354/72 yang diadopsi menjadi SPLN 17A/79 [13].

Penelitian mengenai masalah susut atau *losses* pada transformator distribusi yang dipengaruhi oleh faktor pembebanan. Studi mereka bertujuan memprediksi masa pakai transformator distribusi yang beroperasi 24 jam menggunakan metode regresi linear [14]. Firman Yuris Setiadi [15] melakukan penelitian untuk memprediksi kapasitas transformator di Gardu Induk Mranggen selama 10 tahun ke depan menggunakan metode regresi linear dan eksponensial. Hasilnya menunjukkan bahwa pada tahun 2032, transformator I diprediksi mencapai pembebanan 90,35% (metode regresi linear) atau 88,05% (metode eksponensial), sedangkan transformator II diprediksi mencapai 110,88% (kedua metode). Menurut Septian Firmansyah [16], pembebanan transformator sangat penting untuk mencegah penurunan umur dan kerugian bagi PLN. Masalah umum yang ditemui meliputi beban berlebih, ketidakseimbangan beban, suhu tinggi, dan penurunan efisiensi transformator. Yasir Fauzan dkk [17] juga menemukan bahwa meskipun ketersediaan daya di Malino memadai, beberapa gardu distribusi mengalami beban berlebih atau beban rendah. Contohnya, Gardu MLAB mengalami beban berlebih 16% dan MLAC 6,81%, sementara MLAA berada dalam kondisi beban normal (32%). Mereka menyimpulkan bahwa manajemen transformator diperlukan untuk mengantisipasi kelebihan beban

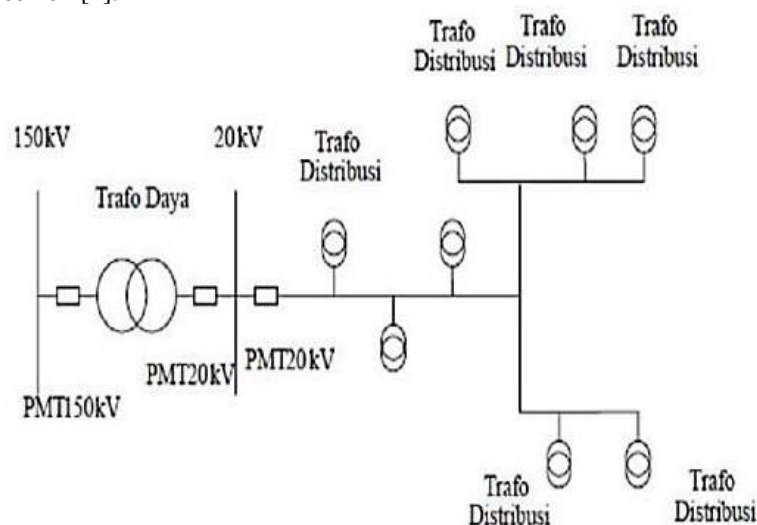
Untuk memitigasi dampak beban lebih dan memperpanjang umur transformator, beberapa solusi strategis dapat diterapkan. Ini meliputi pemantauan berbasis IoT untuk data suhu dan beban *real-time* [9], penggantian transformator dengan kapasitas lebih tinggi [1], pengaturan ulang jaringan untuk distribusi beban yang merata [2], serta implementasi *predictive maintenance* melalui analisis gas terlarut atau pemantauan kondisi berbasis probabilistik [6], [8], [9]. Selain pembebanan, fluktuasi tegangan (seperti *voltage sag* atau *swell*) juga berkontribusi pada penurunan kinerja transformator [2]. Faktor lingkungan seperti kelembaban tinggi, polusi, dan kadar garam yang tinggi dapat memperburuk kondisi isolasi dan kinerja transformator, terutama pada trafo tipe kering [7]. Kesalahan operasional seperti seringnya proses *switching* dan arus masuk awal (*inrush current*) besar juga meningkatkan stres pada transformator [1], [3].

Upaya mitigasi mencakup pemasangan *voltage regulator* untuk menjaga kestabilan tegangan [2], penggunaan *protective coating* pada area rawan korosi [7], pembersihan isolator secara rutin, pelatihan teknis operator [3], serta penggunaan *soft starter* untuk menekan lonjakan arus pada beban besar. Langkah-langkah ini terbukti penting untuk menjaga integritas transformator dan memperpanjang masa pakainya, sehingga meningkatkan keandalan pasokan listrik secara keseluruhan [1], [9].

2. Literatur Review

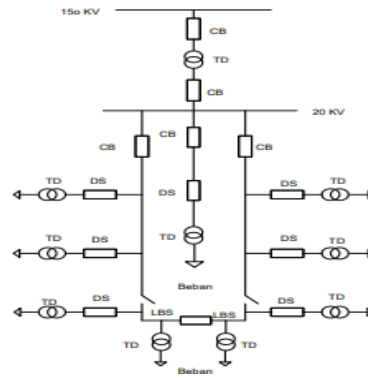
Sistem tenaga listrik modern adalah jaringan kompleks yang dirancang untuk menghasilkan, mentransmisikan, dan mendistribusikan energi listrik ke konsumen. Dalam sistem ini, jaringan distribusi memainkan peran krusial sebagai penghubung akhir antara sistem transmisi dan pelanggan [18]. Jaringan distribusi dapat diklasifikasikan menjadi beberapa skema dasar, di antaranya:

- Jaringan Distribusi Radial: Ini adalah skema yang paling sederhana dan paling umum, di mana daya mengalir dari satu titik sumber ke beban melalui satu jalur saja. Jika terjadi gangguan pada jalur ini, seluruh area yang dilayani akan mengalami pemadaman [1].



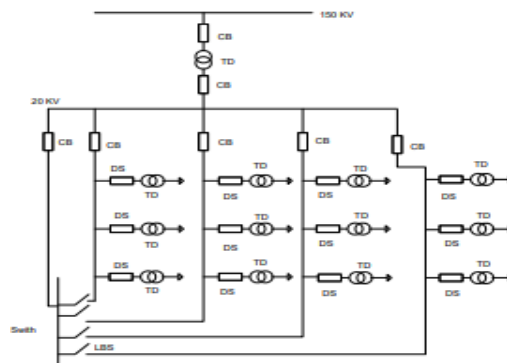
Gambar 2. 1 Skema jaringan distribusi radial [18]

- Jaringan Distribusi Lingkaran (*Ring Main*): skema ini, feeder membentuk lingkaran tertutup. Jika terjadi gangguan di satu titik, daya masih dapat disalurkan dari arah berlawanan, sehingga meningkatkan keandalan sistem [1].



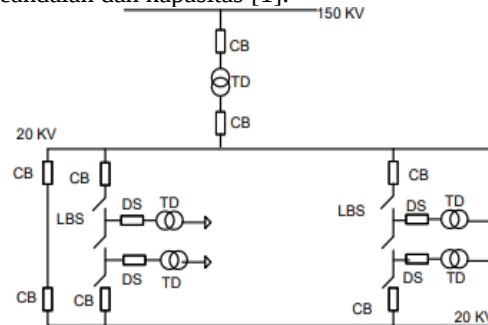
Gambar 2. 2 Skema jaringan distribusi lingkaran [18]

- Jaringan Distribusi Cluster: Skema ini mengelompokkan beban-beban tertentu dalam satu area dan menyuplai mereka dari satu gardu induk kecil atau gardu distribusi.



Gambar 2. 3 Skema jaringan distribusi cluster [18]

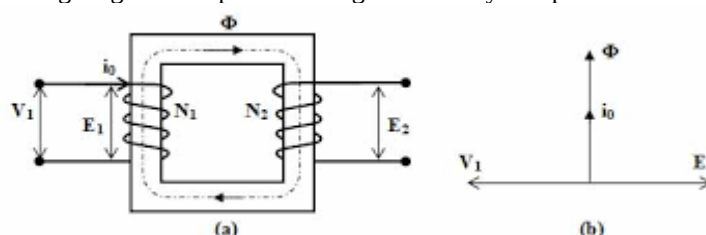
- Jaringan Distribusi Spindel: Merupakan modifikasi dari sistem radial dengan beberapa feeder yang paralel atau bercabang untuk meningkatkan keandalan dan kapasitas [1].



Gambar 2. 4 Skema jaringan distribusi spindel [18]

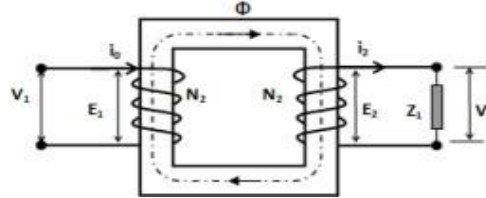
Transformator Transformator adalah perangkat statis yang mentransfer energi listrik antara dua atau lebih rangkaian dengan induksi elektromagnetik, mengubah tingkat tegangan dan arus tanpa mengubah frekuensi [3].

- Prinsip Kerja Transformator: Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik dan hukum Faraday. Ketika arus bolak-balik mengalir melalui kumparan primer, ia menghasilkan medan magnet bolak-balik di inti transformator. Medan magnet ini kemudian menginduksi tegangan di kumparan sekunder. Rasio jumlah lilitan pada kumparan primer terhadap kumparan sekunder menentukan rasio tegangan output terhadap tegangan input [3], [4].
- Transformator Tanpa Beban: Dalam kondisi tanpa beban, kumparan sekunder transformator tidak terhubung dengan beban. Arus kecil (arus magnetisasi) mengalir di kumparan primer untuk menghasilkan fluks magnet di inti. Arus ini menyebabkan rugi-rugi inti tetapi tidak menghasilkan daya output.



Gambar 2. 5 Transformator Tanpa Beban [3]

- Transformator Berbeban: Ketika beban terhubung ke kumparan sekunder, arus mengalir di kumparan sekunder, menghasilkan fluks magnet yang berlawanan dengan fluks primer. Ini menyebabkan peningkatan arus di kumparan primer untuk menyeimbangkan efek fluks sekunder, sehingga transformator dapat menyalurkan daya ke beban [3], [4]. Hubungan tegangan dengan lilitan sangat fundamental dalam menentukan rasio transformasi, yaitu perbandingan antara tegangan primer dan sekunder yang sebanding dengan perbandingan jumlah lilitan pada belitan primer dan sekunder.



Gambar 2. 6 Transformator dalam keadaan berbeban [3]

Gangguan pada Transformator Transformator distribusi rentan terhadap berbagai gangguan yang dapat memengaruhi kinerja dan umur pakainya [19]. Gangguan-gangguan ini secara umum dibagi menjadi dua kategori utama: gangguan internal dan gangguan eksternal. Pemahaman mendalam tentang kedua jenis gangguan ini sangat penting untuk merancang sistem proteksi yang efektif dan melakukan perawatan preventif guna meminimalkan risiko kerusakan [20], [21]. Gangguan Internal: Terjadi di dalam transformator itu sendiri, seringkali melibatkan kegagalan isolasi. Contohnya termasuk hubung singkat antar lilitan, kegagalan isolasi utama antara belitan dan inti, atau kebocoran minyak isolasi. Gangguan internal seringkali disebabkan oleh penuaan isolasi, tegangan lebih transien internal, atau cacat produksi. Jika tidak terdeteksi sejak dini, gangguan internal dapat menyebabkan kerusakan serius bahkan kegagalan total transformator. Gangguan Eksternal: Berasal dari luar transformator namun berdampak pada operasinya. Contohnya meliputi sambaran petir langsung atau tidak langsung yang menyebabkan tegangan surja, hubung singkat di jaringan distribusi (misalnya, hubung singkat fasa-tanah atau antar-fasa), dan fluktuasi beban ekstrem atau beban berlebih yang berkepanjangan. Kualitas daya yang buruk, seperti adanya harmonisa yang tinggi, juga termasuk gangguan eksternal yang dapat mempercepat penuaan transformator [4], [5]. Memahami jenis gangguan ini mendukung implementasi strategi proteksi seperti arrester, relai proteksi, dan monitoring minyak isolasi [6].

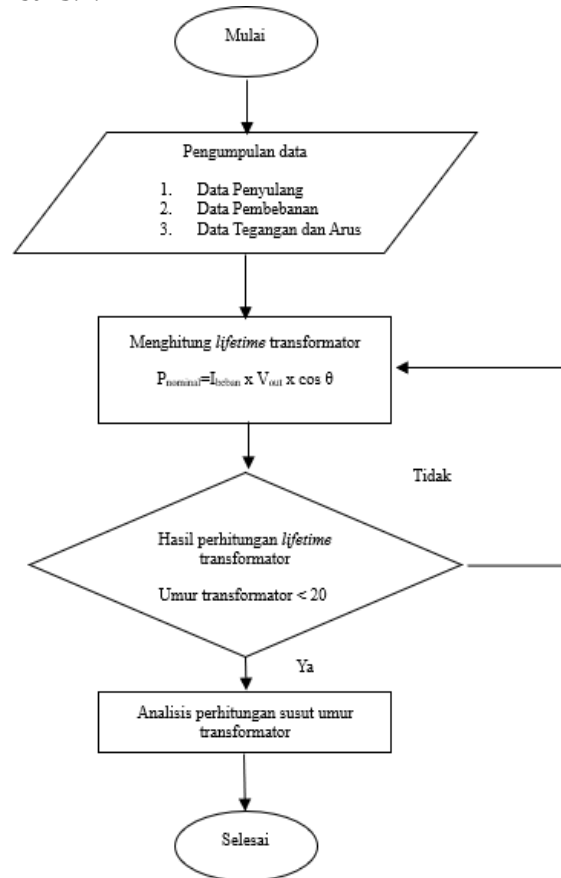
Metode Penilaian Kondisi dan Diagnostik Transformator Untuk memastikan keandalan dan memperpanjang masa pakai transformator, berbagai metode penilaian kondisi dan diagnostik digunakan [22], [23]. Dengan pendekatan yang sistematis, operator dapat memantau kesehatan transformator secara berkala dan mengambil langkah pencegahan yang diperlukan. Pengujian Minyak Isolasi: Salah satu metode yang umum digunakan adalah pengujian minyak isolasi, yang meliputi Analisis Gas Terlarut (DGA) untuk mendeteksi degradasi isolasi atau pelepasan busur listrik internal [6]. DGA merupakan metode diagnostik non-invasif paling umum. Ini melibatkan pengambilan sampel minyak isolasi dan menganalisis jenis serta konsentrasi gas-gas yang terlarut di dalamnya (misalnya, hidrogen, metana, etana, asetilen, karbon monoksida, karbon dioksida). Setiap jenis gas mengindikasikan jenis degradasi atau kerusakan tertentu (misalnya, pelepasan parsial, kerusakan termal, atau busur listrik). Perubahan konsentrasi gas dari waktu ke waktu dapat memberikan peringatan dini tentang masalah internal. Pengukuran Resistansi Isolasi dan Pengujian Tanggapan Frekuensi (FRA): Pengukuran resistansi isolasi dan pengujian tanggapan frekuensi (FRA) juga sering diterapkan untuk mengevaluasi kondisi belitan dan inti transformator [24]. Metode-metode ini memberikan informasi penting tentang tingkat penuaan komponen dan potensi kerusakan yang mungkin terjadi. Pemantauan Kondisi Online: Selain pengujian berbasis laboratorium, pemantauan kondisi secara online semakin banyak digunakan untuk mendeteksi gangguan secara real-time. Sistem ini mencakup sensor suhu, kelembaban, dan getaran yang terpasang pada transformator, memberikan data secara terus-menerus untuk analisis prediktif [7]. Pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI) dan *Internet of Things* (IoT): Dengan kemajuan teknologi *Artificial Intelligence* (AI) dan *Internet of Things* (IoT), diagnostik transformator menjadi lebih akurat dan efisien. Hal ini memungkinkan perawatan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*) sehingga downtime dapat diminimalkan dan umur transformator diperpanjang [8], [9].

Dengan menerapkan berbagai metode diagnostik ini, perusahaan listrik dan operator dapat mengurangi risiko kegagalan transformator yang mahal dan mengganggu pasokan listrik. Kombinasi antara pengujian offline, pemantauan online, dan analisis data canggih menjadikan manajemen aset transformator lebih efektif, sehingga keandalan sistem tenaga listrik tetap terjaga dalam jangka panjang. Metode ini membantu mengidentifikasi masalah potensial sebelum berkembang menjadi kegagalan fatal.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PLN ULP Cilacap Kota, dengan fokus spesifik pada Gardu Distribusi Penyulang LMS01 di jalan Sirkaya, Tambakreja, Cilacap Selatan, Cilacap. Pemilihan lokasi ini didasari oleh adanya indikasi permasalahan pembebanan berlebih pada transformator di area tersebut. Objek penelitian utama yang dikaji adalah transformator distribusi satu fasa berkapasitas 50 kVA, merek B&D, yang secara strategis terpasang di Gardu Distribusi pada Penyulang LMS01, Kelurahan Tambakreja. Transformator ini merupakan elemen vital dalam infrastruktur kelistrikan, berperan sebagai penyalur energi listrik ke pelanggan, dan penelitian ini berfokus pada analisis pengaruh pembebanan terhadap *life-time* operasionalnya.

Metodologi penelitian ini dirancang secara sistematis, mengikuti kerangka kerja berupa diagram alur (*flowchart*) yang memandu setiap tahapan, mulai dari identifikasi masalah awal hingga penarikan kesimpulan akhir dan perumusan saran sesuai gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder, yang diperoleh langsung dari PT. PLN (Persero) ULP Cilacap Kota. Data-data tersebut meliputi informasi tentang kapasitas transformator distribusi Gardu Penyulang LMS01, serta data pengukuran arus dan persentase pembebanan transformator yang terekam dari tahun 2019 hingga 2023. Untuk keperluan pengumpulan data di lapangan, alat utama yang digunakan adalah Tang Ampere, yang berfungsi vital dalam mengukur arus listrik pada transformator, melengkapi data sekunder yang tersedia.

Pelaksanaan penelitian ini terbagi menjadi tiga fase krusial. Fase awal melibatkan pengajuan judul, pengurusan surat keterangan dan perizinan untuk penelitian serta pengambilan data, dan penentuan dosen pembimbing. Fase pelaksanaan adalah inti dari penelitian ini, di mana kegiatan observasi, dokumentasi, dan pengambilan data pengukuran arus pembebanan dilakukan secara langsung di PT. PLN (Persero) ULP Cilacap Kota. Setelah data terkumpul, proses selanjutnya adalah pemrosesan, penyortiran data sesuai kebutuhan analisis, dan perhitungan *life-time* transformator. Fase ini juga mencakup bimbingan berkelanjutan dengan dosen pembimbing dan persiapan untuk pengajuan ujian skripsi. Terakhir, fase akhir penelitian berfokus pada penyusunan laporan, perumusan kesimpulan berdasarkan hasil analisis yang telah diperoleh, dan penyampaian saran-saran yang relevan untuk penelitian di masa mendatang atau aplikasi praktis dalam operasional PLN.

Prosedur penelitian ini diawali dengan pengumpulan data terperinci mengenai arus, tegangan, dan daya beban transformator. Data ini kemudian dianalisis untuk menghitung parameter-parameter penting seperti arus nominal rata-rata, arus beban rata-rata, tegangan input dan output, serta daya beban rata-rata. Langkah selanjutnya adalah perhitungan nilai persentase pembebanan transformator dan analisis nilai error untuk mengevaluasi tingkat penyimpangan dari standar operasional. Tahap paling krusial adalah perhitungan umur pakai atau *life-time* transformator, yang didasarkan pada analisis mendalam terhadap data pembebanan yang telah terkumpul. Hasil analisis *life-time* ini akan menjadi landasan utama dalam perumusan rekomendasi pemeliharaan transformator yang bertujuan untuk secara efektif memperpanjang masa pakainya.

Penelitian ini didasari oleh hipotesis bahwa pembebanan berlebih pada transformator distribusi akan secara signifikan mempercepat penurunan umur pakainya (*life-time*) dari standar yang telah ditetapkan, yaitu 20 tahun. Hipotesis ini diajukan dengan asumsi bahwa peningkatan suhu operasional yang diakibatkan oleh beban yang mendekati atau bahkan melebihi kapasitas nominal transformator akan merusak material isolasi. Melalui analisis data pengukuran pembebanan dan perhitungan sisa umur pakai transformator, penelitian ini berupaya untuk membuktikan validitas hipotesis tersebut, memberikan pemahaman yang lebih kuat mengenai dampak pembebanan terhadap aset kritis dalam sistem distribusi Listrik.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Data Pengukuran Transformator

Data pengukuran transformator dikumpulkan secara berkala selama periode 2019 hingga 2023, mencakup pengukuran pada siang dan malam hari. Data ini sangat krusial karena merefleksikan profil pembebanan aktual transformator.

Tabel 4. 1 Data Rata-Rata Pengukuran Transformator pada Tahun 2019-2023 (Siang)

Bulan	I Nominal (A)	I Beban (A)	V Input (kV)	V Output (kV)
2019	226	107,58	20,00	18,96
2020	226	124,75	20,00	18,77
2021	226	163,83	20,00	18,79
2022	226	179,92	20,00	18,80
2023	226	193,33	20,00	18,80
Σ	1130	769,41	100	94,12
Rata-rata	226	153,882	20	18,824

Tabel 4. 2 Data Rata-Rata Pengukuran Transformator pada Tahun 2019-2023 (Malam)

Bulan	I Nominal (A)	I Beban (A)	V Input (kV)	V Output (kV)
2019	226	115,75	20,00	19,03
2020	226	137,92	20,00	18,84
2021	226	167,17	20,00	18,86
2022	226	190,17	20,00	18,83
2023	226	108,08	20,00	18,82
Σ	1130	819,09	100	94,38
Rata-rata	226	163,818	20	18,876

Pada tabel 4.1 dan 4.2 adanya fluktuasi pembebanan harian, malam hari, terutama, teridentifikasi bahwa arus beban seringkali jauh melampaui arus beban penuh nominal transformator, mencapai angka yang mengindikasikan kondisi *overload* parah dan berkelanjutan. Sebagai contoh, pada tahun 2023, rata-rata arus beban pada malam hari mencapai 163,81 A, sementara arus beban penuh nominal transformator 50 kVA adalah 226 A. Kondisi pembebanan berlebih yang ekstrem ini merupakan penyebab utama penurunan drastis pada umur pakai transformator.

4.2 Perhitungan Arus Beban Penuh Transformator

Arus nominal transformator didefinisikan sebagai jumlah maksimum arus yang dapat diterima oleh transformator secara kontinu tanpa menyebabkan kerusakan. Untuk transformator satu fasa 50 kVA (50.000 VA) dengan tegangan input nominal 400 Volt yang digunakan di Penyulang LMS01, perhitungan arus beban penuh (IFL) dilakukan menggunakan rumus dasar daya semu $S = V \times I$. Dengan demikian, arus beban penuh nominal transformator adalah $IFL = \frac{S}{V} = \frac{50000}{400} = 125A$. Angka ini menjadi acuan penting untuk membandingkan dengan arus beban rata-rata aktual yang diukur, guna menentukan apakah transformator beroperasi dalam kondisi beban normal atau overload.

4.3 Perhitungan Arus Nominal Rata-Rata Transformator

Untuk mendapatkan nilai arus nominal diperlukan parameter yaitu daya semu (VA) dan tegangan input (Volt) pada sebuah transformator.

Tabel 4. 3 Data Arus Nominal Rata-Rata Transformator

Tahun	I Nominal Siang (A)	I Nominal Malam (A)
2019	226	226
2020	226	226
2021	226	226
2022	226	226
2023	226	226
Σ	1130	1130
Rata-rata	226	226

Berdasarkan Tabel 4.3 diatas merupakan data yang didapatkan dari hasil pengukuran arus nominal pada transformator Penyulang LMS01 dalam 5 tahun terakhir dari 2019 sampai dengan 2023. Dari data pengukuran pada tabel 4.5 akan dilakukan perhitungan arus beban rata-rata selama 5 tahun yang hasilnya akan digunakan sebagai parameter untuk mendapatkan nilai arus.

$$I_{Nominal} = \frac{I_{Nominal}Siang + I_{Nominal}Malam}{n} = \frac{226 + 226}{2} = \frac{452}{2} = 226A$$

Dari perhitungan diatas dapat diketahui arus nominal yang dihasilkan pada transformator 1 fasa 50kVa pada Penyulang LMS01 adalah 226 A.

4.4 Perhitungan Arus Beban Rata-Rata Transformator

Arus beban rata-rata transformator dihitung berdasarkan data pengukuran arus yang telah dikumpulkan selama lima tahun terakhir (2019-2023). Arus listrik didefinisikan sebagai aliran muatan listrik per satuan waktu, bergerak dari potensial tinggi ke rendah.

Tabel 4. 4 Data Arus Beban Rata-Rata Transformator

Tahun	I Beban Siang (A)	I Nominal Malam (A)
-------	-------------------	---------------------

2019	107,58	115,75
2020	124,75	137,92
2021	163,83	167,17
2022	179,92	190,17
2023	193,33	208,08
Σ	769,41	819,09
Rata-rata	153,88	163,82

Data dari Tabel 4.4 menunjukkan rata-rata arus beban transformator pada berbagai periode, yang kemudian digunakan untuk menilai sejauh mana transformator beroperasi di atas atau di bawah kapasitas nominalnya. Perbandingan antara arus beban rata-rata dengan arus nominal sangat esensial untuk mengidentifikasi adanya pembebanan berlebih yang dapat mempengaruhi umur pakai transformator.

$$I_{Beban} = \frac{I_{Beban} \text{ Siang} + I_{Beban} \text{ Malam}}{n} = \frac{153,88 + 163,82}{2} = \frac{317,7}{2} = 158,85A$$

Berdasarkan perhitungan, rerata total arus beban adalah 317,7 Ampere. Rata-rata arus beban setiap tahun dari 2019 sampai dengan 2023 adalah 158,85 Ampere. Ini berarti, dari kapasitas transformator 50 kVA yang sebesar 226 Ampere, hanya 158,85 Ampere yang sedang terpakai saat pengukuran.

4.5 Perhitungan Tegangan Input dan Output Transformator

Perhitungan tegangan input dan output rata-rata transformator dilakukan berdasarkan data pengukuran tegangan listrik pada Penyulang LMS01 selama lima tahun terakhir (2019-2023).

Tabel 4.5 Data Tegangan Input dan Output Rata-Rata Transformator

Tahun	Siang		Malam	
	V Input (kV)	V Output (kV)	V Input (kV)	V Output (kV)
2019	20	18,96	20	19,03
2020	20	18,78	20	18,84
2021	20	18,79	20	18,86
2022	20	18,80	20	18,83
2023	20	18,80	20	18,82
Σ	100	93,13	100	94,38

Data ini, yang tersaji dalam Tabel 4.5, menjadi parameter penting untuk mengevaluasi efisiensi transformator dan kondisi kualitas daya pada lokasi penelitian. Contoh perhitungan menunjukkan rata-rata tegangan input sebesar 20 Volt, yang digunakan sebagai parameter untuk mendapatkan nilai tegangan secara keseluruhan.

Stabilitas tegangan input dan kesesuaian tegangan output dengan standar sangat memengaruhi kinerja dan umur transformator. Fluktuasi tegangan yang sering, seperti voltage sag atau swell, dapat menambah stres pada belitan transformator dan mempercepat degradasi kinerjanya.

- $V_{Input} = \frac{V_{Input} \text{ Siang} + V_{Input} \text{ Malam}}{n} = \frac{20+20}{2} = \frac{40}{2} = 20kV$
- $V_{Output} = \frac{18,83 + 18,88}{2} = \frac{37,7}{2} = 18,85kV$

Dari hasil perhitungan diatas, rerata tegangan input adalah 20 kV. Jumlah rerata tegangan output adalah sebesar 37,7 kV. Rata-rata nilai tegangan output selama 5 tahun dari 2019 sampai dengan 2023 adalah sebesar 18,85 kV.

4.6 Perhitungan Daya Beban Rata-Rata Transformator

Daya beban rata-rata transformator dihitung dari hasil pengukuran arus beban dan tegangan listrik yang dicatat di Penyulang LMS01 selama periode 2019-2023.

Tabel 4. 6 Data Daya Beban Rata-Rata Transformator

Tahun	I Beban (A)	V Output (kV)
2019	Siang	107,58
	Malam	115,75
2020	Siang	124,75
	Malam	137,92
2021	Siang	163,83
	Malam	17,17
2022	Siang	179,92
	Malam	190,17
2023	Siang	193,33
	Malam	108,08
Σ	1588,50	188,51
Rata-rata	158,85	18,55

Berdasarkan Tabel 4.6 diatas merupakan data arus beban dan tegangan output yang didapatkan dari hasil pengukuran arus beban dan tegangan listrik yang ada di Penyulang LMS01 selama 5 tahun dari 2019-2023 yang hasilnya akan digunakan sebagai parameter untuk mendapatkan nilai persentase daya.

$$P_{Beban} = V \times I \times \cos \varphi = 18,85 \times 158,85 \times 0,99 = 2693,49kV$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, daya beban adalah sebesar 2693,49 kVA. Hasil perhitungan ini digunakan sebagai salah satu parameter untuk mendapatkan hasil persentase daya.

4.7 Perhitungan Nilai Persentase

Perhitungan nilai persentase merupakan metode untuk menunjukkan perbandingan antara nilai terukur (seperti tegangan keluaran, arus beban, dan daya beban) dengan nilai nominal yang seharusnya. Perhitungan ini krusial karena hasilnya akan digunakan sebagai parameter untuk menentukan nilai error. Contoh perhitungan persentase arus yang diberikan adalah:

- $I\% = \frac{I_{Nominal} - I_{Beban}}{I_{Nominal}} \times 100\% = \frac{226 - 258,85}{226} \times 100\% = 29,71\%$
- $V\% = \frac{V_{Input} - V_{Output}}{V_{Input}} \times 100\% = \frac{20 - 18,85}{20} \times 100\% = 5,75\%$
- $P\% = \frac{P_{Nominal} - P_{Beban}}{P_{Nominal}} \times 100\% = \frac{2964,51 - 2693,49}{2964,51} \times 100\% = 9,14\%$

Catatan:

$$P_{Nominal} = I_{Beban} \times V_{Output} \times \cos 0,85^\circ = 158,85 \times 18,85 \times 0,99 = 2964,51 \text{ kVA}$$

$$P^* = \text{Nilai Jumlah Presentase} = 29,71\% + 5,75\% + 9,14\% = 44,60\%$$

Nilai persentase yang tinggi, terutama pada pembebanan arus, menunjukkan bahwa transformator beroperasi pada atau di atas kapasitasnya, yang memiliki implikasi serius terhadap umur pakainya.

4.8 Perhitungan Nilai Error

Perhitungan nilai *error* dilakukan untuk mengukur penyimpangan antara kondisi operasional aktual transformator dengan standar yang ditetapkan. Nilai error ini merupakan indikator penting mengenai seberapa jauh kinerja transformator menyimpang dari kondisi ideal atau yang diharapkan.

- $E = \left(\frac{P - P^*}{P_{Nominal}} \right) \times 100\% = \frac{80\% - 44,60\%}{80\%} \times 100\% = 44,25\%$

Berdasarkan perhitungan, nilai *error* yang didapat adalah 62,53%. Perhitungan ini mempertimbangkan beberapa parameter, yaitu batas pemakaian transformator (ditetapkan sebesar 80%) serta persentase tegangan, arus, dan daya total 17,47%. Nilai error ini kemudian digunakan sebagai salah satu parameter untuk memperkirakan sisa umur pakai transformator.

4.9 Perhitungan Umur Pakai Transformator

Memprediksi usia pakai transformator bertujuan untuk mengetahui berapa lama perangkat tersebut dapat beroperasi secara efektif. Penelitian ini menggunakan pendekatan berbasis nilai kesalahan (*error*) dalam prediksi. Menurut Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN Nomor 17A:1979), usia standar transformator ditetapkan selama 20 tahun, yang setara dengan 7.300 hari atau 175.200 jam (dihitung dari 20 tahun $\times$ 365 hari $\times$ 24 jam). Hasil perhitungan prediksi dari waktu pemakaian transformator adalah sebagai berikut:

$$\text{Sisa waktu pakai} = (100\% - 44,25\%) = 55,75\%$$

$$\text{Konversi ke Jam} = \frac{55,75}{100} \times 175200 = 97675 \text{ Jam}$$

$$\text{Konversi ke Hari} = \frac{55,75}{100} \times 7300 = 4070 \text{ Hari}$$

$$\text{Konversi ke Tahun} = \frac{4070}{360} = 11,15 \text{ Tahun}$$

$$\text{Konversi ke Tahun} = 11 \text{ Tahun lebih 3 bulan}$$

Berdasarkan perhitungan nilai error yang didapatkan sisa waktu pakai adalah 11 tahun 3 bulan dengan dasar 1 tahun adalah 365 hari. Maka lifetime dari transformator akan berkurang 8 tahun 9 bulan dari standarisasi penggunaan transformator selama 20 tahun.

4.10 Analisis Pemeliharaan Transformator

Analisis *lifetime* transformator secara konsisten menunjukkan bahwa pembebanan berlebih secara signifikan mempercepat penurunan umur pakai perangkat, sejalan dengan studi yang menggarisbawahi dampak peningkatan suhu akibat *overload* yang dapat memangkas umur transformator hingga separuhnya, terutama jika beroperasi secara kontinu pada 90-100% kapasitasnya. Dalam konteks Gardu LMS01, tingginya pembebanan, khususnya pada malam hari, menjadi faktor dominan yang mempercepat degradasi termal isolasi, mengurangi kekuatan dielektrik dan mekanis isolasi, dan akhirnya menyebabkan kegagalan transformator jauh sebelum umur desainnya [25], [26].

4.11 Rekomendasi Pemeliharaan Transformator

Mengingat estimasi sisa umur pakai transformator yang sangat singkat (sekitar 8 tahun 9 bulan hingga 2027), penelitian ini merekomendasikan pemeliharaan rutin mingguan (cek fisik, suhu), bulanan (ukur arus-tegangan, cek pendingin), dan tahunan (uji kualitas minyak, resistansi isolasi, rasio belitan) untuk menjaga keandalannya. Selain itu, pembatasan beban di bawah 70% kapasitas nominal transformator sangat esensial untuk mencegah overheating dan penuaan isolasi yang dipercepat; jika beban sering melebihi batas ini, penggantian transformator dengan kapasitas lebih besar atau pengaturan ulang jaringan distribusi perlu dipertimbangkan, dilengkapi dengan implementasi sistem pemantauan berbasis IoT untuk *predictive maintenance*.

5. Kesimpulan

Berdasarkan analisis data pada transformator distribusi merek B&D di penyulang LMS01, Kelurahan Tambakreja, ULP Cilacap Kota, ditemukan adanya penurunan umur pakai (*lifetime*) yang signifikan akibat pembebanan. Perhitungan menunjukkan bahwa pembebanan, khususnya pada malam hari yang memiliki beban lebih besar, menjadi faktor utama penurunan ini. Dengan pembebanan mencapai 70%, lifetime transformator berkurang secara substansial. Hasil perhitungan menunjukkan adanya eror 44,25% dari standar PLN yang menetapkan umur

pakai 20 tahun. Alhasil, sisa waktu pakai transformator diperkirakan hanya 11 tahun 3 bulan, atau berkurang 8 tahun 9 bulan dari standar awal.

Daftar Pustaka

- [1] O. S. Adekunle, "Strategies for Managing End-of-Life Power Transformers," *International Journal of Electrical Engineering Education*, vol. 58, no. 2, pp. 120–130, 2021.
- [2] C. D. Brown, "Analysis of Voltage Sags and Swells in Distribution Networks and Their Impact on Equipment Life," *International Journal of Power Systems and Technology*, 2021.
- [3] E. F. Davidson, *Transformer Design and Theory of Operation*, 2020.
- [4] S. Gupta, "Accelerated Thermal Ageing of Transformer Insulation," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 70, no. 1, pp. 50–58, 2019.
- [5] International Electrotechnical Commission, IEC 354: Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers, IEC Standard, 1972.
- [6] International Electrotechnical Commission, IEC 60599: Mineral Oil-Filled Electrical Equipment in Service – Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis, IEC Standard, 2020.
- [7] T. J. Kim, "Performance Evaluation of Dry-Type Transformers in High Humidity," in *Proc. IAS Annu. Meeting*, pp. 1–6, 2020.
- [8] H. Li, "Probabilistic Reliability Assessment of Transformers," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 195, p. 106720, 2020.
- [9] J. P. Singh, "Review on Condition Monitoring and Health Management of Power Transformers," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, p. 110410, 2021.
- [10] Manurung, Yosua Bitcar Jonathan. *Studi Analisis Keandalan dan Efisiensi Transformator Daya di Gardu Induk Denai Pt. Pln Persero*. Diss. Universitas Sumatera Utara, 2021.
- [11] Ramadhan, Tabah. "Pengaruh Rugi-Rugi Total Terhadap Suhu Dan Tepat Guna Transformator Akibat Pembebanan Distribusi Di PT Dow Agrosiences Indonesia." *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik [JIMT] 2.2* (2022).
- [12] Aditama, I., I. Putu Sutawinaya, and I. Wayan Sudiarta. *Analisis Pengaruh Treatment Minyak Transformator terhadap Penurunan Rugi-Rugi Daya Transformator Berdasarkan Perubahan Temperatur Transformator pada DS0873 Penyulang Katedral UP3 Bali Selatan*. Diss. Politeknik Negeri Bali, 2022.
- [13] Nugraha, Mohammad Trian, and DINI FAUZIAH. "Penanggulangan Overload Transformator Distribusi dengan Metode Uprating di Gardu PNBS 20 KV ULP Pangandaran." *Prosiding Seminar Nasional Energi, Telekomunikasi dan Otomasi (SNETO)*. 2021.
- [14] Maruf, Ali, and Yohanes Primadiyono. "Analisis Pengaruh Pembebanan Dan Temperatur Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga 60 Mva Unit 1 Dan 2 Di Gi 150 Kv Kalisari." *Edu Elekrika Journal* 10.1 (2021): 19-24.
- [15] Setyadi, Firman Yuris. *Analisa Peramalan Beban pada Gardu Induk 150 KV Mranggen dengan Metode Regresi Linear dan Eksponensial*. Diss. Universitas Islam Sultan Agung Semarang, 2024.
- [16] Firmansyah, Septian. *Analisa Pembebanan Gardu Distribusi KT 105 Penyulang Muara*. Diss. Politeknik Negeri Bali, 2024.
- [17] Fauzan, Yasir, et al. "Persentase Pembebanan Trafo untuk Melayani Gardu-Gardu Distribusi pada Jaringan Tegangan Menengah." *Arus Jurnal Sains dan Teknologi* 2.2 (2024): 348-352.
- [18] Alfita, Riza, Rosida Vivin Nahari, and Adi Kurniawan Saputro. *TEKNIK TENAGA LISTRIK (KONSEP DAN APLIKASI). PENERBIT KBM INDONESIA*, 2025..
- [19] Sukadana, I. Wayan, Ketut Dody Darmawan, and I. Wayan Utama. "Deteksi Dini Gangguan Transformator Berbasis Manajemen Transformator Untuk Meningkatkan Kinerja Operasi dan Finansial Di PT. PLN ULP Singaraja." *Jurnal Teknik Elektro* 10.2 (2021): 77-85.
- [20] Yasa, I. Wayan Sugara. "Mengatasi Transformator Overload Dengan Metode Uprating Transformator Pada Gardu Distribusi." *Jurnal Kajian Teknik Elektro* 8.2 (2023): 82-91.
- [21] Alfaresi, Bengawan, Dhany Rafiko, and Feby Ardianto. "Penerapan Metode TDCG dan Duval Triangle untuk Diagnosis Gangguan Internal pada Transformator Distribusi (Studi Kasus PT. Angkasa Pura Indonesia SMB II Palembang)." *Jurnal Ampere* 10.2 (2025): 233-242.
- [22] Nugroho, Haryoto Prasetyo. *Dissolved Gas Analysis (Dga) untuk Diagnosis Gangguan pada Transformator Daya Pltgu Pt Pln (Persero) Unit Pelaksana Pembangunan Belawan*. Diss. Universitas Sumatera Utara, 2021.
- [23] Nisworo, Spto, Amawan Hasibuan, and Muhammad Daud. "Evaluasi Kondisi Belitan Generator Transformers (GT) Dengan Sweep Frequency Response Analysis." *RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi): Jurnal Teknik Elektro* 5.1 (2022): 51-56.
- [24] Akhdiyatul, Akhdiyatul. "Analisis Kegagalan Transformator Pltu Sukabungun 2x10 MW Melalui Pengujian Dissolved Gas Analysis (Dga) Dan Breakdown Voltage (BDV)." *Electrical Network Systems and Sources* 1.1 (2022): 30-36.
- [25] Setiawan, Ferry, Farhan Alkhalif, and Aldi Henda Hermawan. "Analisis Kegagalan Transfomer Rectifier Unit 3 Pada Pesawat Boeing 737-200 Dengan Metode FMEA." *Inaque: Journal of Industrial and Quality Engineering* 13.1 (2025): 51-67.
- [26] CP, Angger Yulinda, M. Taqijuddin Alawiy, and Bambang Minto Basuki. "Analisis Kegagalan Trafo Berdasarkan Hasil Pengujian Dissolved Gas Analysis Pada Trafo I 50 MVA 150/20kV GI PIER." *SCIENCE ELECTRO* 10.1 (2019).