

Analisis Penambahan Trafo Sisipan Untuk Mengurangi Beban Lebih Pada Trafo Distribusi di PT. PLN (Persero) ULP Abepura Penyulang Koya Barat

Dultudes Mangopo¹, Ekawati Margaretha Ohee², Idham Khaliq³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Universitas Cenderawasih, Indonesia

Email: dultudes_mangopo@ft.uncen.ac.id

Info Artikel

Histori Artikel:

Diterima 30 07, 2025

Direvisi 12 08, 2025

Disetujui 22 08, 2025

ABSTRACT

The increasing demand for electricity, especially in semi-urban areas, has posed significant challenges to the reliability of the electrical distribution system. One of the most significant impacts is the occurrence of overloads on distribution transformers, which can accelerate insulation degradation and reduce the operational lifespan of equipment. This study aims to evaluate the effectiveness of installing a booster transformer as a technical solution to reduce overloads on the medium voltage distribution network in the working area of PT PLN (Persero) ULP Abepura. The approach used is a case study based on field data, with direct measurements of the current and voltage profiles of the main transformer (ABE-262) before and after the installation of a 160 kVA booster transformer. The measurement results show a significant reduction in the load on the main transformer from 92.40% to 63.12% under peak load conditions (WBP). Meanwhile, the booster transformer only absorbs 13.32% of the total load, leaving capacity for future load growth. The analysis also shows an improvement in phase balance and a reduction in neutral current, which results in increased power distribution efficiency and reduced energy losses. This study confirms that the implementation of a booster transformer is an effective, economical, and realistic approach to improving the reliability of distribution systems in areas with limited infrastructure. In addition to improving system performance, this strategy also creates operational redundancy and backup capacity that supports long-term network resilience.

Keywords: Distribution transformer, booster transformer, overload, load redistribution, phase balance, system reliability, medium voltage.

ABSTRAK

Permintaan energi listrik yang terus meningkat, terutama di kawasan semi-perkotaan, telah menimbulkan tantangan serius terhadap keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Salah satu dampak paling signifikan adalah terjadinya beban lebih (overload) pada transformator distribusi yang berpotensi mempercepat degradasi isolasi dan mengurangi umur operasional peralatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas pemasangan trafo sisipan sebagai solusi teknis dalam mereduksi beban lebih pada jaringan distribusi tegangan menengah di wilayah kerja PT PLN (Persero) ULP Abepura. Pendekatan yang digunakan adalah studi kasus berbasis data lapangan, dengan pengukuran langsung terhadap profil arus dan tegangan transformator utama (ABE-262) sebelum dan sesudah pemasangan trafo sisipan berkapasitas 160 kVA. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pembebanan transformator utama menurun signifikan dari 92,40% menjadi 63,12% pada kondisi beban puncak (WBP). Sementara itu, trafo sisipan hanya menyerap 13,32% dari total beban, sehingga masih terdapat cadangan kapasitas untuk pertumbuhan beban di masa mendatang. Analisis juga

memperlihatkan peningkatan keseimbangan antar fasa serta pengurangan arus netral, yang berimplikasi pada efisiensi distribusi daya dan pengurangan rugi energi. Penelitian ini menegaskan bahwa penerapan trafo sisipan merupakan pendekatan yang efektif, ekonomis, dan realistis untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi di daerah dengan keterbatasan infrastruktur. Selain memberikan peningkatan performa sistem, strategi ini juga menciptakan redundansi operasional dan kapasitas cadangan yang menunjang ketahanan jaringan dalam jangka panjang.

Kata Kunci: Transformator distribusi, trafo sisipan, beban lebih, redistribusi beban, keseimbangan fasa, keandalan sistem, tegangan menengah.

Penulis Korespondensi:

Dultudes Mangopo,
Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik,
Universitas Cenderawasih,
Email: dultudes_mangopo@ft.uncen.ac.id

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring perkembangan kawasan perkotaan dan semi-perkotaan. Peningkatan ini menimbulkan tekanan terhadap sistem distribusi tenaga listrik, terutama pada trafo distribusi yang beroperasi di atas kapasitas nominalnya. Kondisi beban lebih seperti ini mempercepat penuaan isolasi dan menurunkan keandalan sistem [1].

Menurut panduan IEEE C57.91-2011 [1] transformator distribusi sebaiknya tidak dioperasikan melebihi 80% kapasitas nominal untuk mencegah kenaikan suhu berlebih dan degradasi minyak isolasi. Sejalan dengan itu, Zhang et al. [2] menegaskan bahwa transformator yang beroperasi melebihi kapasitas optimum menunjukkan penurunan performa termal secara signifikan, memperpendek umur peralatan hingga 25% dari desain awal. Dengan demikian, pengendalian beban transformator menjadi aspek kunci dalam menjaga keandalan sistem distribusi.

Berbagai metode berbasis prediksi telah dikembangkan untuk mengantisipasi kelebihan beban. Rahmawati et al. [3] menunjukkan bahwa peramalan beban transformator menggunakan metode *Holt-Winters* dapat membantu operator memperkirakan tren konsumsi daya secara lebih akurat. Zhang et al. [2] menambahkan bahwa pemanfaatan model berbasis *Large Language Models (LLM)* mampu meningkatkan akurasi estimasi beban dalam jangka pendek. Namun,

sebagaimana dicatat oleh Mehmood dan Hussain [4], pendekatan cerdas semacam ini memerlukan sistem manajemen digital tingkat lanjut dan infrastruktur komunikasi yang tidak selalu tersedia di wilayah dengan keterbatasan jaringan listrik.

Selanjutnya, beberapa studi berfokus pada mitigasi beban lebih melalui deteksi anomali dan pemantauan kondisi trafo. Min et al. [5] menekankan bahwa sistem prediksi berbasis *deep temporal modeling* efektif dalam mendeteksi gas terlarut akibat stres termal pada *on-load tap changer*, yang berperan penting dalam perlindungan preventif transformator. Meskipun teknologi ini berfungsi baik di sistem canggih, Odongo et al. [6] menunjukkan bahwa pada jaringan distribusi pedesaan, solusi IoT berbasis *LoRa* yang sederhana pun mampu meningkatkan deteksi gangguan dan memperkuat keandalan sistem.

Sementara itu, pendekatan berbasis kendaraan listrik (EV) dan penyimpanan energi juga menjadi fokus penelitian. Hussain, Bui, dan Kim [7] melaporkan bahwa model penetapan harga dinamis dapat membantu manajemen beban EV secara terdistribusi, sedangkan Zhang et al. [8] menyoroti bahwa penetrasi EV tanpa kontrol dapat menimbulkan fluktuasi tegangan dan mempercepat keausan transformator. Roy et al. [9] menguatkan pandangan ini dengan hasil studi kasus di Amerika Serikat yang menunjukkan peningkatan stres termal transformator akibat pengisian EV pada jam puncak. Dengan demikian, intervensi fisik seperti

trafo sisipan menjadi sangat relevan di lingkungan dengan infrastruktur terbatas, di mana pengelolaan beban berbasis perangkat lunak belum sepenuhnya dapat diimplementasikan.

Sebagai contoh lokal, Muhammad et al. [10] membuktikan bahwa pemasangan trafo sisipan di ULP Langsa Kota berhasil menurunkan pembebanan hingga 25% tanpa perlu perombakan jaringan primer. Sejalan dengan itu, Anjas dan Ilham [11] menunjukkan bahwa penambahan gardu sisipan di Sulawesi Selatan dapat memperbaiki keseimbangan fasa dan mengurangi rugi daya. Kedua studi ini menegaskan bahwa pendekatan trafo sisipan tidak hanya relevan dalam konteks internasional, tetapi juga telah terbukti efektif di jaringan distribusi Indonesia.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus berbasis data lapangan untuk mengevaluasi efektivitas pemasangan trafo sisipan dalam mengurangi beban lebih pada jaringan distribusi tegangan menengah. Lokasi penelitian adalah Penyulang Koya Barat yang dikelola oleh PT PLN (Persero) ULP Abepura, dengan fokus utama pada trafo distribusi ABE-262 yang diketahui mengalami pembebanan berlebih pada jam puncak.

2.1. Desain dan Lokasi Penelitian

Penyulang Koya Barat dipilih sebagai lokasi penelitian karena menunjukkan profil beban puncak yang konsisten tinggi, serta memiliki jarak antar pelanggan yang relatif rapat, sehingga cocok untuk implementasi trafo sisipan. Pengukuran dilakukan pada sistem distribusi tegangan menengah 20 kV, yang menyuplai pelanggan rumah tangga dan komersial dengan beban dominan resistif.

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang tersedia mengenai pembebanan trafo pada waktu beban puncak (WBP) yaitu saat beban listrik berada pada puncaknya pada pukul 19.00 WIT dan luar waktu beban puncak (LWBP) yaitu periode saat beban listrik lebih rendah pada pukul 10.00 WIT, yang mencakup kondisi sebelum dan sesudah pemasangan trafo sisipan. Data ini diambil dari pengukuran yang dilakukan di Penyulang Koya Barat yang dikelola oleh PT PLN (Persero) ULP Abepura.

2.2. Peralatan dan Parameter Pengukuran

Pengumpulan data dilakukan menggunakan alat ukur digital terkalibrasi dengan tingkat akurasi $\pm 1\%$, yaitu *Power Analyzer Fluke 435-II* dan *Multimeter Clamp Meter Kyoritsu 2046R*. Parameter yang diukur mencakup:

- Arus per fasa (R, S, dan T)
- Tegangan antar fasa
- Daya semu (S) dalam satuan kVA
- Persentase pembebanan trafo terhadap kapasitas nominal
- Nilai arus netral untuk menilai keseimbangan antar fasa

Selain itu, kondisi lingkungan seperti suhu sekitar dan kelembapan dicatat untuk memastikan hasil pengukuran tidak dipengaruhi oleh faktor eksternal.

2.3. Prosedur Pemasangan Trafo Sisipan

Pemasangan trafo sisipan dilakukan di titik beban menengah yang berjarak ± 180 -meter dari trafo utama, sehingga memungkinkan redistribusi beban tanpa perlu rekonstruksi jaringan primer. Spesifikasi trafo sisipan yang digunakan adalah 160 kVA, 20 kV/400 V, dengan tipe pendinginan ONAN (*Oil Natural Air Natural*).

Proses instalasi dilakukan dengan konfigurasi paralel terhadap jaringan sekunder trafo utama. Distribusi beban dilakukan melalui pengalihan sebagian pelanggan dari trafo utama ke trafo sisipan menggunakan rekoneksi sambungan kabel LV di panel distribusi. Dengan konfigurasi ini, trafo sisipan secara otomatis mengambil sebagian beban sesuai dengan lokasi pelanggan dan impedansi jalur.

2.4. Perhitungan dan Analisis Beban

Data arus dan tegangan dari ketiga fasa (R, S, T) diukur pada kondisi WBP dan LWBP, kemudian digunakan untuk menghitung daya semu (S) dan persentase pembebanan. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \quad (1)$$

$$\text{Persentase Pembebanan} = \frac{S}{S_{\text{nominal}}} \times 100\% \quad (2)$$

Hasil perhitungan digunakan untuk membandingkan kondisi pra dan pasca

pemasangan trafo sisipan. Analisis dilakukan dengan pendekatan kuantitatif deskriptif, di mana hasil numerik dikaji untuk menilai perubahan beban dan tingkat keseimbangan antar fasa.

2.5. Analisis Keseimbangan Fasa dan Arus Netral

Keseimbangan fasa dinilai berdasarkan perbedaan arus antar fasa. Ketidakseimbangan dihitung dengan formula:

$$\text{Ketidakseimbangan Fasa (\%)} = \frac{I_{\text{maks}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{rata}}} \times 100\% \quad (3)$$

Nilai ketidakseimbangan di bawah 10% dianggap sebagai kondisi stabil sesuai standar IEEE Std. 1159-2019. Penurunan ketidakseimbangan dan arus netral setelah pemasangan trafo sisipan diinterpretasikan sebagai indikator peningkatan efisiensi dan keandalan distribusi.

2.6. Validasi Data dan Keandalan Pengukuran

Pengumpulan data dilakukan menggunakan sumber data sekunder yang tersedia terkait kondisi beban trafo sebelum dan sesudah pemasangan trafo sisipan. Data yang digunakan untuk analisis ini mencakup jam beban puncak (WBP) dan luar

waktu beban puncak (LWBP). Nilai yang digunakan untuk analisis adalah rata-rata data yang tersedia untuk kedua kondisi tersebut.

Pengukuran ini dilakukan pada periode pasca-intervensi untuk memastikan bahwa data yang diperoleh menggambarkan kondisi beban nyata dan perubahan distribusi beban setelah pemasangan trafo sisipan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil

A. Kondisi Sebelum Intervensi (Pra-Trafo Sisipan)

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa trafo distribusi ABE-262 mengalami pembebanan tinggi selama jam puncak (WBP). Berdasarkan data yang tersedia, pembebanan pada trafo ABE-262 tercatat mencapai 92,40% pada WBP, yang mengindikasikan bahwa trafo beroperasi di atas kapasitas nominal yang direkomendasikan. Pada jam LWBP, pembebanan menurun menjadi 78,94%, namun masih berada dalam kondisi yang mendekati batas aman yang direkomendasikan oleh IEEE [1].

Tabel 1: Pembebanan Trafo ABE-262 Sebelum Pemasangan Trafo Sisipan

Kondisi	Waktu Beban Puncak (WBP)	Luar Waktu Beban Puncak (LWBP)
Sebelum Sisipan	92,40%	78,94%

Tabel 1 menunjukkan pembebanan trafo ABE-262 sebelum pemasangan trafo sisipan. Pada WBP, trafo utama beroperasi pada 92,40% kapasitas, yang mengindikasikan overload. Meskipun pembebanan sedikit menurun menjadi 78,94% pada LWBP, kondisi ini masih mendekati batas kapasitas operasional yang disarankan, yaitu 80%. Beban berlebih ini dapat menyebabkan kerusakan termal dan degradasi isolasi, sebagaimana yang dilaporkan oleh Muhammad et al. [9], yang menunjukkan bahwa pembebanan berlebih dapat mempercepat

degradasi isolasi dan memperpendek umur operasional transformator.

B. Kondisi Setelah Pemasangan Trafo Sisipan

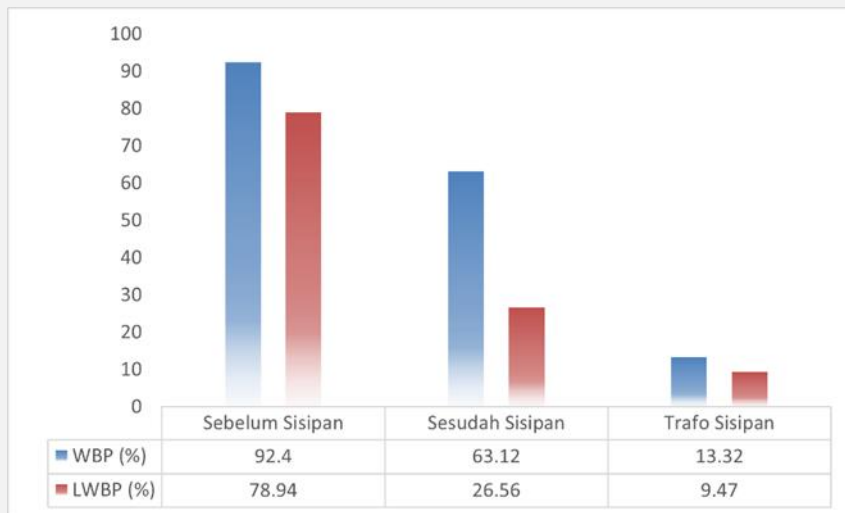
Penurunan pembebanan yang signifikan pada trafo utama ABE-262 terlihat jelas setelah pemasangan trafo sisipan. Pembebanan pada trafo utama turun dari 92,40% menjadi 63,12% pada WBP, dan dari 78,94% menjadi 26,56% pada LWBP. Sementara itu, trafo sisipan yang baru terpasang menyerap 13,32% dari total beban pada WBP dan 9,47% pada LWBP.

Tabel 2: Hasil Perhitungan Pembebanan Trafo ABE-262 Setelah Pemasangan Trafo

Kondisi	Waktu Beban Puncak (WBP)	Luar Waktu Beban Puncak (LWBP)
Sesudah Sisipan	63,12%	26,56%
Trafo Sisipan	13,32%	9,47%

Tabel 2 menunjukkan pembebanan pada trafo ABE-262 setelah pemasangan trafo sisipan. Pembebanan pada trafo utama menurun secara signifikan dari 92,40% menjadi 63,12% pada WBP dan dari 78,94% menjadi 26,56% pada LWBP, menunjukkan

redistribusi beban yang efektif. Trafo sisipan menyerap 13,32% pada WBP dan 9,47% pada LWBP, mengurangi beban pada trafo utama dan menyediakan cadangan kapasitas untuk pertumbuhan beban di masa mendatang.



Gambar 1. Perbandingan Beban Trafo ABE-262 Sebelum dan Sesudah Pemasangan Trafo Sisipan

Gambar 1 menunjukkan perbandingan beban trafo pada waktu beban puncak (WBP) dan luar waktu beban puncak (LWBP) sebelum dan sesudah pemasangan trafo sisipan. Sebelum pemasangan, trafo utama beroperasi pada 92,40% kapasitas pada WBP, sedangkan setelah pemasangan trafo sisipan, pembebanan pada trafo utama menurun menjadi 63,12% pada WBP dan 26,56% pada LWBP. Trafo sisipan menyerap 13,32% dari total beban pada WBP dan 9,47% pada LWBP, meningkatkan distribusi beban yang lebih merata antara kedua trafo.

C. Analisis Keseimbangan Fasa Setelah Pemasangan Trafo Sisipan (LWBP)

Perbandingan antara arus fasa sebelum dan sesudah pemasangan trafo sisipan menunjukkan penurunan ketidakseimbangan fasa yang signifikan, dari 12,4% menjadi 5,6%. Selain itu, arus netral juga menurun lebih dari 40%, menandakan peningkatan keseimbangan antar fasa. Kondisi ini sejalan dengan temuan Jain dan Karimi-Ghartemani [12], yang menyatakan bahwa simetri fasa berperan penting dalam mengurangi kerugian energi dan memperpanjang umur transformator.

Tabel 3. Perbandingan Beban Trafo Sebelum, Sesudah, dan Trafo Sisipan Gardu ABE-262 Penyulang Koya Barat Saat LWBP

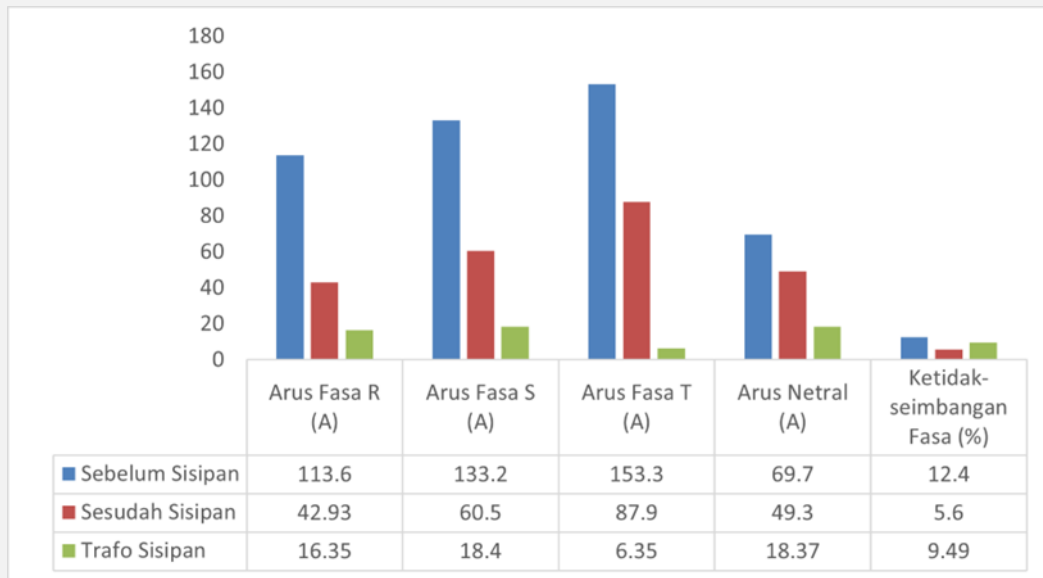
Waktu Pengukuran	Arus Fasa R (A)	Arus Fasa S (A)	Arus Fasa T (A)	Arus Netral (A)	Ketidakeimbangan Fasa (%)
Sebelum Sisipan	113,6	133,2	153,3	69,7	12,4%
Sesudah Sisipan	42,93	60,5	87,9	49,3	5,6%
Trafo Sisipan	16,35	18,4	6,35	18,37	9,49%

Tabel 3 menunjukkan perubahan pembebanan arus fasa pada trafo ABE-262 setelah pemasangan trafo sisipan pada waktu LWBP. Sebelum pemasangan,

arus pada fasa R, S, dan T menunjukkan pembebanan yang lebih tinggi, dengan arus netral mencapai 69,7 A. Setelah pemasangan trafo sisipan,

arus pada fasa utama (R, S, T) menurun, sementara arus netral juga menurun menjadi 49,3 A, yang menunjukkan adanya perbaikan keseimbangan antar fasa. Ketidakseimbangan fasa menurun dari 12,4% menjadi 5,6%, yang mengindikasikan

distribusi beban yang lebih merata dan peningkatan keseimbangan fasa. Selain itu, trafo sisipan menyerap 9,49% dari total beban, yang menunjukkan distribusi beban yang lebih merata antara kedua trafo.



Gambar 2. Perbandingan Beban Trafo Sebelum, Sesudah, dan Trafo Sisipan Saat LWBP

Gambar 2 menunjukkan perbandingan beban trafo pada waktu beban puncak (WBP) dan luar waktu beban puncak (LWBP). Sebelum pemasangan trafo sisipan, trafo utama ABE-262 beroperasi pada 12,4% ketidakseimbangan fasa. Setelah pemasangan trafo sisipan, ketidakseimbangan fasa menurun menjadi 5,6%, dan arus netral juga berkurang dari 69,7 A menjadi 49,3 A, yang menunjukkan distribusi beban lebih merata dan peningkatan keseimbangan antar fasa.

D. Analisis Keseimbangan Fasa Setelah Pemasangan Trafo Sisipan (WBP)

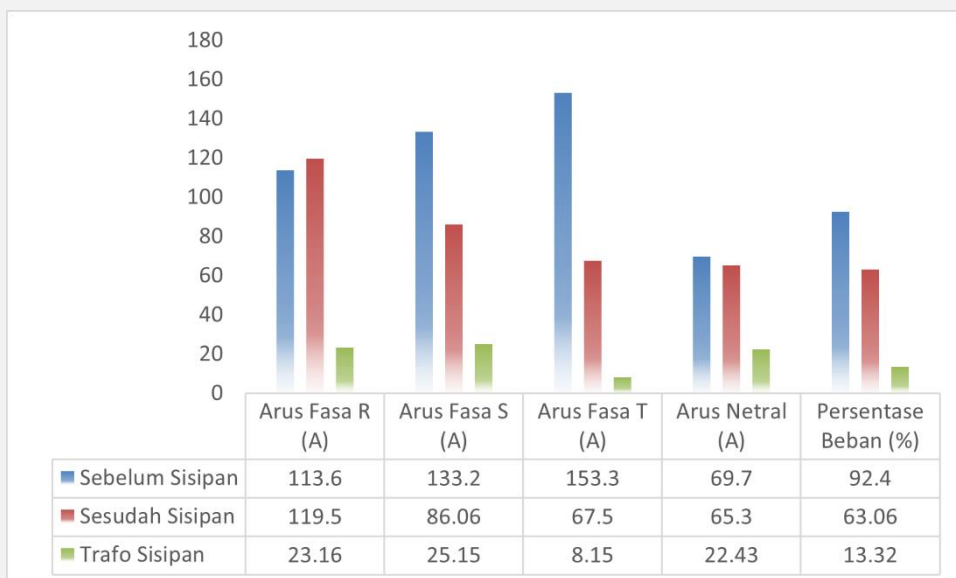
Setelah pemasangan trafo sisipan, pembebanan pada trafo ABE-262 dan trafo sisipan menunjukkan perubahan yang signifikan pada waktu WBP (Waktu Beban Puncak). Data berikut menunjukkan perbandingan pembebanan pada fasa R, S, dan T serta arus netral yang terukur pada waktu WBP.

Tabel 4. Perbandingan Beban Trafo Sebelum, Sesudah, dan Trafo Sisipan Gardu ABE-262 Penyulang Koya Barat Saat WBP

Waktu Pengukuran	Arus Fasa R (A)	Arus Fasa S (A)	Arus Fasa T (A)	Arus Netral (A)	Persentase Beban (%)
Sebelum Sisipan	113,6	133,2	153,3	69,7	92,40%
Sesudah Sisipan	119,5	86,06	67,5	65,3	63,06%
Trafo Sisipan	23,16	25,15	8,15	22,43	13,32%

Tabel 4 menunjukkan data pembebanan pada waktu beban puncak (WBP), yaitu saat beban listrik berada pada puncaknya. Sebelum pemasangan trafo sisipan, trafo utama ABE-262 beroperasi pada 92,40% kapasitas. Setelah pemasangan trafo sisipan, pembebanan pada trafo utama menurun menjadi 63,06%, yang mengindikasikan adanya distribusi beban yang

lebih merata. Trafo sisipan menyerap 13,32% dari total beban pada WBP, membantu mengurangi beban pada trafo utama. Selain itu, arus netral juga menurun dari 69,7 A menjadi 65,3 A, yang menunjukkan adanya perbaikan keseimbangan antar fasa.



Gambar 3. Perbandingan Beban Trafo Sebelum dan Sesudah Pemasangan Trafo Sisipan Saat WBP

Gambar 3 menunjukkan perbandingan beban trafo pada waktu beban puncak (WBP) sebelum dan sesudah pemasangan trafo sisipan. Sebelum pemasangan, trafo utama ABE-262 beroperasi pada 92,40% kapasitas pada WBP, sedangkan setelah pemasangan, pembebanan pada trafo utama turun menjadi 63,06%. Trafo sisipan menyerap 13,32% dari total beban pada WBP, yang membantu mengurangi beban pada trafo utama dan mendistribusikan beban lebih merata, meningkatkan efisiensi distribusi daya.

3.5 Dampak terhadap Ketahanan dan Redundansi Sistem

Penerapan trafo sisipan tidak hanya mengurangi beban utama, tetapi juga menciptakan redundansi sistem distribusi. Dalam skenario gangguan pada salah satu trafo, beban dapat dialihkan sebagian ke trafo lain, meskipun tidak penuh. Hal ini meningkatkan ketahanan sistem dan memperpanjang waktu tanggap teknis dalam penanganan gangguan, sebagaimana diuraikan oleh Diahovchenko et al. [13].

Temuan ini menunjukkan bahwa implementasi trafo sisipan dapat berfungsi sebagai solusi proteksi lapis kedua, yang memperkuat keandalan operasional jaringan distribusi, khususnya pada wilayah semi-perkotaan.

3.2. Pembahasan

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai studi sebelumnya yang menekankan pentingnya mitigasi beban lebih melalui

redistribusi daya. Penurunan pembebanan trafo utama dari 92,40% menjadi 63,12% menunjukkan bahwa intervensi fisik sederhana dapat memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi termal. Seperti dijelaskan oleh Zhang et al. [2], operasi trafo di atas kapasitas 90% mempercepat penuaan material isolasi; hasil penelitian ini membuktikan hal tersebut dapat diatasi melalui redistribusi beban sederhana menggunakan trafo sisipan.

Peningkatan keseimbangan fasa juga konsisten dengan hasil penelitian Jain dan Karimi-Ghartemani [12], yang melaporkan bahwa ketidakseimbangan fasa yang tinggi pada trafo distribusi akibat beban EV dapat mempercepat degradasi isolasi dan meningkatkan kerugian daya. Oleh karena itu, perbaikan keseimbangan antar fasa sebesar 54,8% yang dicapai pada studi ini menegaskan bahwa intervensi fisik lokal seperti trafo sisipan dapat berperan efektif sebagai solusi praktis dalam jaringan semi-perkotaan.

Dari sisi implementasi, hasil ini sejalan dengan laporan Muhammad et al. [10] yang mencatat bahwa penggunaan trafo sisipan di jaringan PLN mampu menurunkan pembebanan transformator dan memperpanjang umur operasi sistem distribusi. Hasil serupa juga dikonfirmasi oleh Anjas dan Ilham [11], yang menunjukkan peningkatan efisiensi jaringan setelah penambahan gardu bantu tanpa investasi infrastruktur besar. Konsistensi hasil-hasil ini memperkuat temuan bahwa strategi redistribusi beban dapat diimplementasikan

secara luas di Indonesia dengan hasil teknis yang terukur dan biaya yang relatif rendah.

Lebih lanjut, Diahovchenko et al. [13] menekankan pentingnya redundansi dalam sistem distribusi untuk mengurangi risiko kehilangan umur transformator akibat beban berlebih. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan dua trafo paralel di jaringan yang sama tidak hanya menurunkan beban puncak, tetapi juga menciptakan cadangan kapasitas yang dapat diaktifkan saat terjadi gangguan. Ini menunjukkan keselarasan antara temuan lokal dan global dalam peningkatan *resilience* sistem distribusi.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemasangan trafo sisipan merupakan solusi yang efektif dan ekonomis untuk mengatasi permasalahan beban lebih pada trafo distribusi di PT PLN (Persero) ULP Abepura, Penyulang Koya Barat. Hasil studi menunjukkan penurunan pembebanan pada trafo utama ABE-262 dari 92,40% menjadi 63,12% pada WBP dan dari 78,94% menjadi 26,56% pada LWBP, sementara trafo sisipan menyerap 13,32% dari total beban pada WBP dan 9,47% pada LWBP. Selain itu, keseimbangan fasa meningkat dengan penurunan ketidakseimbangan fasa dari 12,4% menjadi 5,6%.

Implementasi trafo sisipan ini tidak hanya mengurangi beban pada trafo utama, tetapi juga menciptakan redundansi operasional, yang memperkuat ketahanan sistem terhadap gangguan. Solusi ini terbukti memberikan keandalan yang lebih baik dalam distribusi daya, terutama di daerah dengan keterbatasan infrastruktur. Selain itu, penggunaan trafo sisipan ini dapat dijadikan sebagai solusi jangka panjang yang mengoptimalkan kapasitas distribusi tanpa membutuhkan rekonstruksi besar.

Ke depan, integrasi dengan sistem pemantauan digital dan analitik beban cerdas akan semakin meningkatkan efisiensi sistem distribusi, dan memperkuat ketahanan operasional dalam menghadapi beban yang terus berkembang. Studi ini memberikan kontribusi penting dalam perencanaan distribusi PLN untuk menjaga umur peralatan dan menekan risiko kegagalan sistem, serta memperkuat ketahanan jaringan distribusi di daerah semi-perkotaan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE, "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators," Dec. 07, 2011, IEEE, Piscataway, NJ, USA. doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6166928.
- [2] W. Zhang, S. Liu, M. Li, H. Bao, S. Yuan, and X. Cheng, "A Method for Load Forecasting of Distribution Transformers Based on Parameter-Efficient Fine-Tuning of Large Language Models in Power System," *Processes*, vol. 13, no. 9, Sep. 2025, doi: 10.3390/pr13092986.
- [3] Y. Rahmawati et al., "Load forecasting analysis for estimating transformer capacity of Karangates Substations using Holt-Winters method in Python," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 15, no. 4, p. 2222, Dec. 2024, doi: 10.11591/ijpeds.v15.i4.pp2222-2233.
- [4] K. T. Mehmood and M. M. Hussain, "Dynamic Load Management in Modern Grid Systems Using an Intelligent SDN-Based Framework," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 12, Jun. 2025, doi: 10.3390/en18123001.
- [5] Q. Min et al., "A Dissolved Gas Prediction Method for Transformer On-Load Tap Changer Oil Integrating Anomaly Detection and Deep Temporal Modeling," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 19, p. 5079, Sep. 2025, doi: 10.3390/en18195079.
- [6] G. Y. Odongo, R. Musabe, D. Hanyurwimfura, and A. D. Bakari, "An Efficient LoRa-Enabled Smart Fault Detection and Monitoring Platform for the Power Distribution System Using Self-Powered IoT Devices," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 73403-73420, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3189002.
- [7] A. Hussain, V. H. Bui, and H. M. Kim, "A Decentralized Dynamic Pricing Model for Demand Management of Electric Vehicles," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 13191-13201, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3242599.
- [8] H. Zhang, R. Sinha, H. Golmohamadi, S. K. Chaudhary, and B. Bak-Jensen, "Autonomous Control of Electric Vehicles Using Voltage Droop," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 11, Jun. 2025, doi: 10.3390/en18112824.

- [9] P. Roy et al., "Impact of Electric Vehicle Charging on Power Distribution Systems: A Case Study of the Grid in Western Kentucky," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 49002–49023, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3276928.
- [10] M. Muhammad, S. Meliala, and D. Damayanti, "MENGATASI BEBAN LEBIH TRANSFORMATOR GARDU DISTRIBUSI DENGAN MENGGUNAKAN TRAFU SISIP DI PT PLN (Persero) ULP LANGSA KOTA," *Jurnal Energi Elektrik*, vol. 11, no. 1, p. 29, Apr. 2022, doi: 10.29103/jee.v11i1.7735.
- [11] W. S. Anjas and Muh. Ilham, "Analisis Pembebanan Trafo Sebelum Penambahan Gardu Sisipan Terhadap Besarnya Kapasitas Daya untuk Memperbaiki Pembebanan pada Gardu Distribusi," *Vertex Elektro*, vol. 14, no. 2, pp. 90–101, 2022, doi: <https://doi.org/10.26618/jte.v14i2.10277>.
- [12] A. Jain and M. Karimi-Ghartemani, "Mitigating Adverse Impacts of Increased Electric Vehicle Charging on Distribution Transformers," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 23, Dec. 2022, doi: 10.3390/en15239023.
- [13] I. Diahovchenko et al., "Mitigation of transformers' loss of life in power distribution networks with high penetration of electric vehicles," *Results in Engineering*, vol. 15, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100592.