

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

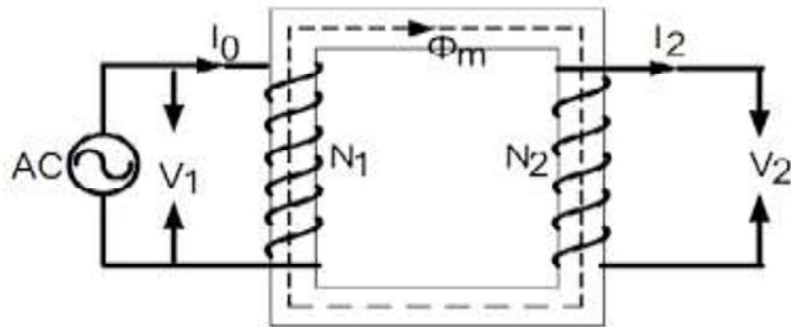
2.1 Landasan Teori

2.1.1 Transformator Distribusi

Secara umum, transformator merupakan perangkat listrik yang berfungsi untuk memindahkan serta mengubah energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lainnya tanpa mengubah frekuensinya, dengan memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik melalui gandengan medan magnet.

Pada sistem tenaga listrik, transformator distribusi berperan penting dalam menurunkan tegangan dari jaringan transmisi menjadi tegangan distribusi agar dapat digunakan oleh konsumen. Transformator distribusi pada prinsipnya memiliki fungsi dan cara kerja yang sama dengan transformator daya. Perbedaan utama terletak pada tingkat tegangannya, di mana tegangan rendah pada transformator daya masih relatif lebih tinggi apabila dibandingkan dengan tegangan tinggi pada transformator distribusi. Pada transformator distribusi, baik sisi tegangan tinggi maupun sisi tegangan rendah termasuk dalam kategori tegangan distribusi, yaitu tegangan menengah (TM) dan tegangan rendah (TR). Transformator distribusi berperan sebagai peralatan akhir dalam sistem penyaluran tenaga listrik, yang berfungsi menurunkan tegangan dari jaringan distribusi menengah menjadi tegangan rendah. Energi listrik yang telah diturunkan tegangannya tersebut kemudian disalurkan secara langsung kepada pelanggan, baik pelanggan rumah tangga maupun pelanggan non-rumah tangga, sesuai dengan kebutuhan daya masing-masing

Sebuah transformator tersusun atas inti besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Besarnya perbandingan tegangan yang dihasilkan bergantung pada jumlah lilitan antara kedua kumparan tersebut. Umumnya, kumparan dibuat dari kawat tembaga yang dililitkan mengelilingi kaki inti transformator. Adapun komponen utama penyusun transformator dapat dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 2. 1 Bagian-bagian transformator, sumber (Jurnal Simetrik, 2025)

V_1 : Tegangan Primer

V_2 : Tegangan Sekunder

I_0 : Arus Primer

I_2 : Arus Sekunder

Prinsip dasar perpindahan energi pada transformator didasarkan pada pemberian tegangan bolak-balik (AC) pada kumparan primer untuk menghasilkan medan magnet di sekitarnya. Garis-garis fluks magnet yang terbentuk kemudian memotong kumparan sekunder, sehingga terjadi induksi tegangan pada terminalnya. Besarnya tegangan yang dihasilkan pada kedua kumparan tersebut sebanding dengan jumlah lilitan pada masing-masing belitan. Berdasarkan jumlah fasanya, transformator dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu transformator satu fasa (1 fasa) dan transformator tiga fasa (3 fasa).

1. Transformator Satu Fasa

Transformator satu fasa merupakan transformator yang beroperasi pada sistem arus bolak-balik satu fasa, di mana proses perubahan tegangan terjadi secara serentak dalam satu rangkaian. Transformator ini dirancang untuk melayani sistem kelistrikan dengan karakteristik beban yang relatif sederhana dan tidak terlalu besar. Umumnya, transformator satu fasa digunakan pada kondisi beban yang didominasi oleh peralatan penerangan dan pemanas, serta peralatan listrik rumah tangga lainnya. Transformator satu fasa dioperasikan menggunakan suplai tegangan satu fasa dan banyak diterapkan pada

jaringan distribusi di wilayah pemukiman atau daerah dengan tingkat kebutuhan daya yang relatif kecil. Penggunaan transformator satu fasa dinilai lebih ekonomis dan praktis untuk melayani pelanggan dengan beban rendah hingga menengah, serta memudahkan dalam pemasangan dan pemeliharaan sistem distribusi tenaga listrik.

2. Transformator Tiga Fasa

Transformator tiga fasa memiliki inti yang terdiri dari tiga kaki, di mana masing-masing kaki dilengkapi dengan belitan primer dan sekunder. Untuk penyaluran daya yang sama, penggunaan satu unit transformator tiga fasa dinilai lebih ringan, lebih ekonomis, dan memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan tiga unit transformator satu fasa. Meskipun demikian, penggunaan beberapa unit transformator satu fasa juga memiliki keunggulan, antara lain biaya investasi awal yang lebih rendah serta fleksibilitas dalam pengoperasian. Pada kondisi tertentu, beban dapat dilayani hanya dengan dua unit transformator, sementara unit tambahan dapat dipasang seiring dengan meningkatnya kebutuhan beban. Selain itu, apabila terjadi gangguan pada salah satu unit, penyaluran daya tidak harus dihentikan secara keseluruhan.

2.1.2 Gardu Distribusi

Gardu distribusi merupakan salah satu komponen penting dalam sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi sebagai penghubung antara jaringan distribusi dengan konsumen. Gardu distribusi berperan dalam menyalurkan energi listrik dari jaringan distribusi ke pelanggan dengan tingkat tegangan yang sesuai, baik untuk konsumen tegangan menengah maupun konsumen tegangan rendah (Luase, 2015). Selain berfungsi sebagai titik penyaluran daya, gardu distribusi juga berperan dalam pengaturan, pengamanan, dan pengendalian sistem distribusi agar penyaluran tenaga listrik berlangsung secara andal dan aman. Dalam Buku 4 PLN, disebutkan bahwa gardu distribusi diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis berdasarkan konstruksi dan penempatannya, antara lain:

1. Gardu Beton

Gardu distribusi jenis beton dibangun permanen pada lokasi yang telah ditentukan. Umumnya gardu beton dibangun untuk konsumen atau daerah perkotaan yang sudah

mantap plan analoginya. “Konstruksi ini dimaksudkan untuk pemenuhan persyaratan terbaik bagi keselamatan ketenagalistrikan.” (Buku PLN 4)



Gambar 2. 2 Gardu Beton , sumber (Buku 4 PLN, 2010)

2. Gardu Kios

Bangunan gardu ini umumnya terbuat dari konstruksi baja, fiberglass, atau kombinasi keduanya. Jenis gardu tersebut dirancang untuk digunakan pada lokasi-lokasi tertentu yang tidak memungkinkan pembangunan gardu permanen berbahan beton, seperti area dengan keterbatasan lahan, pertimbangan estetika, maupun kondisi lingkungan tertentu.

Selain itu, gardu ini memiliki sifat mobilitas yang tinggi sehingga dapat dipindahkan atau dipasang dengan relatif mudah sesuai kebutuhan sistem distribusi. Namun, karena keterbatasan konstruksi dan pertimbangan keselamatan operasional, kapasitas transformator yang dapat dipasang pada jenis gardu ini relatif terbatas dan disesuaikan dengan standar yang ditetapkan dalam PLN Buku 4.



Gambar 2. 3 Gardu Kios, sumber (Buku 4 PLN, 2010)

3. Gardu Portal

Gardu portal merupakan jenis gardu transformator distribusi yang seluruh instalasinya dipasang pada dua buah tiang atau lebih. Transformator, peralatan proteksi, serta perlengkapan pendukung lainnya terpasang pada konstruksi tiang tersebut sehingga tidak memerlukan bangunan khusus. Gardu portal umumnya digunakan pada daerah dengan keterbatasan lahan dan kebutuhan distribusi daya yang relatif sedang.

Sebagai sistem pengaman, gardu portal dilengkapi dengan Fuse Cut Out (FCO) yang berfungsi sebagai pengaman terhadap gangguan hubung singkat dan beban lebih pada transformator. Selain itu, Lightning Arrester (LA) digunakan sebagai proteksi terhadap tegangan lebih akibat surja petir agar tidak merusak peralatan transformator. Penggunaan sistem pengaman ini disesuaikan dengan ketentuan dan standar yang tercantum dalam PLN Buku 4.



Gambar 2.4 Gardu Portal, sumber (Dokumentasi Pribadi)

4. Gardu Cantol

Pada gardu distribusi tipe ini, transformator yang digunakan umumnya memiliki kapasitas daya relatif kecil, yaitu sekitar 100 kVA, baik untuk transformator satu fasa maupun tiga fasa. Kapasitas tersebut lebih rendah apabila dibandingkan dengan transformator yang digunakan pada jenis gardu distribusi lainnya. Meskipun demikian, gardu distribusi tipe ini memiliki keunggulan tersendiri karena transformatornya telah dilengkapi dengan peralatan switching dan sistem proteksi jenis CSP (Completely Self Protected Transformer) yang terintegrasi langsung di dalam tangki transformator. Keberadaan sistem proteksi CSP ini berfungsi untuk melindungi transformator dari gangguan seperti hubung singkat, beban lebih, dan gangguan tegangan, sehingga meningkatkan keandalan dan keselamatan operasi transformator serta mengurangi risiko kerusakan pada peralatan distribusi (PLN Buku 4).



Gambar 2.5 Gardu Cantol, *sumber (Dokumentasi Pribadi)*

2.1.3 Pembebanan Transformator

Beban listrik merupakan bagian dari rangkaian akhir sistem distribusi tenaga listrik yang memanfaatkan energi listrik untuk diubah menjadi bentuk energi lain seperti cahaya, panas, gerak, magnet, dan sebagainya. Oleh karena itu, suplai daya menuju beban harus terjamin kontinuitasnya agar keandalan sistem tenaga listrik tetap terjaga. Untuk mencapai kondisi andal tersebut, sistem tenaga listrik harus mampu menghadapi berbagai gangguan tanpa menimbulkan pemadaman pada sisi beban.

Berdasarkan ketentuan SPLN, transformator distribusi sebaiknya dioperasikan dengan pembebanan tidak lebih dari 80% dan tidak kurang dari 40% kapasitas nominalnya. Apabila pembebanan melebihi batas atas atau di bawah batas bawah tersebut, maka transformator dikategorikan mengalami beban lebih (*overload*) atau beban ringan (*underload*). Oleh karena itu, transformator diupayakan beroperasi dalam rentang beban tersebut. Jika pembebanan transformator terlalu tinggi, perlu dilakukan tindakan seperti

penggantian transformator, penambahan unit baru (penyisipan), atau mutasi transformator ke lokasi lain yang lebih sesuai.

Kondisi overload dapat menyebabkan kenaikan suhu pada transformator karena penghantar tidak lagi mampu menahan arus berlebih, sehingga timbul panas yang mempercepat kerusakan pada isolasi lilitan. Setiap transformator memiliki batas operasi tertentu; apabila terus-menerus bekerja dalam kondisi beban lebih, maka suhu akan meningkat secara signifikan, mengakibatkan kerusakan pada isolasi, degradasi material, dan akhirnya kerusakan total transformator. Selain itu, overload juga berdampak pada penurunan kualitas daya listrik, terjadinya penurunan tegangan (*voltage drop*) pada ujung jaringan, serta pemendekan umur pakai transformator

2.1.4 Jaringan Tegangan Rendah (JTR)

Bagian hilir dari sistem tenaga listrik dikenal sebagai jaringan distribusi, yaitu bagian yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari gardu distribusi ke pelanggan atau konsumen akhir. Melalui jaringan ini, listrik yang telah diturunkan tegangannya dapat dimanfaatkan oleh berbagai pengguna sesuai kebutuhan.

Salah satu komponen penting dalam sistem ini adalah Jaringan Tegangan Rendah (JTR), yang bertugas menyalurkan daya listrik dari gardu distribusi ke konsumen pada tingkat tegangan 230 volt untuk sistem satu fasa dan 400 volt untuk sistem tiga fasa, sesuai dengan standar yang digunakan oleh PT PLN (Persero).

Pada umumnya, dari setiap gardu distribusi keluar empat jalur jaringan sekunder yang disusun secara radial (satu arah). Setiap jalur tersebut terdiri atas empat konduktor, yaitu tiga kawat fasa dan satu kawat netral. Sistem ini dirancang agar penyaluran daya listrik ke pelanggan tetap stabil, aman, dan efisien, serta memudahkan dalam pengaturan beban dan deteksi gangguan pada jaringan distribusi tegangan rendah.

2.1.5 Manuver Beban Transformator

Manuver beban transformator adalah suatu teknik pengalihan atau pelimpahan beban dari transformator atau penyulang yang mengalami beban lebih (overload) ke transformator atau penyulang lain yang kondisinya masih memiliki kapasitas cadangan (underload). Tujuan utama manuver beban adalah untuk mengurangi beban pada

transformator yang kelebihannya melebihi kapasitas nominal sehingga dapat mencegah kerusakan, menjaga keandalan sistem distribusi, serta memastikan kontinuitas pasokan listrik kepada pelanggan.

Landasan teori manuver beban berdasarkan literatur menyebutkan bahwa manuver jaringan distribusi adalah manipulasi teknik pada jaringan listrik dengan membuka atau menutup peralatan switching pada jaringan agar dapat membatasi wilayah padam, membagi beban secara optimal, dan memulihkan pasokan listrik pada area yang terkena gangguan. Manuver ini dilakukan dengan memperhatikan syarat-syarat teknis seperti kesamaan tegangan dan frekuensi antara penyulang, kemampuan penyulang penerima beban untuk menampung beban tambahan, kesamaan urutan fasa, dan kondisi peralatan switching yang baik. Dengan pelaksanaan manuver, distribusi beban dapat disesuaikan secara dinamis sesuai kondisi nyata di lapangan sehingga risiko overload pada suatu transformator dapat diminimalkan

2.1.6 Uprating Kapasitas Transformator

Dalam sistem pendistribusian tenaga listrik, transformator sering menghadapi kondisi beban berlebih atau overload, yang biasanya disebabkan oleh meningkatnya kebutuhan energi dari masyarakat maupun gangguan pada penyaluran listrik yang menyebabkan transformator bekerja pada suhu tinggi atau bahkan terjadi hubungan singkat. Untuk mengatasi peningkatan beban ini dan memastikan kualitas serta kapasitas pelayanan listrik tetap optimal bagi pelanggan, diperlukan penambahan kapasitas daya pada transformator distribusi tersebut, atau yang dikenal dengan istilah uprating transformator.

Uprating transformator adalah proses meningkatkan kapasitas daya nominal transformator untuk mengakomodasi beban listrik yang terus bertambah tanpa harus mengganti seluruh perangkat transformator. Metode ini dianggap lebih efisien dan ekonomis dibanding harus menambah atau merelokasi transformator baru, terutama ketika ruang atau anggaran terbatas. Dengan uprating, risiko kerusakan akibat beban berlebih bisa diminimalisir, umur teknis transformator dapat dipertahankan, dan keandalan sistem distribusi listrik juga meningkat. Selain itu, implementasi uprating harus disertai evaluasi prospek pertumbuhan beban listrik jangka panjang agar kapasitas

transformator yang ditingkatkan dapat mendukung kebutuhan energi masa depan secara berkelanjutan.

Namun, pelaksanaan uprating juga perlu memperhatikan dampak teknis seperti perubahan level tegangan, penyesuaian faktor beban, serta perlunya penambahan proteksi keamanan untuk menghindari gangguan atau kerusakan yang lebih serius. Dengan demikian, uprating transformator merupakan solusi strategis yang penting dalam manajemen sistem distribusi tenaga listrik yang dinamis dan terus berkembang saat ini.

2.1.7 Perhitungan Arus Beban Penuh Transformator

Daya transformator bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

S = daya transformator (KVA)

V = tegangan sisi primer transformator (V)

I = Arus (A)

Sehingga untuk menghitung arus beban penuh (IFL) dapat menggunakan persamaan :

$$IFL = \frac{S}{V \times \sqrt{3}} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana:

IFL = arus beban penuh (A)

S = Daya transformator (KVA)

V = Tegangan sisi sekunder transformator (V)

Sebelum menghitung persentase pembebanan, menghitung arus rata-rata beban terukur, yakni sebagai berikut:

$$IRata-rata = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

I Rata-rata = rata-rata arus beban (A)

IR = arus fasa R (A)

IS = arus fasa S (A)

IT = arus fasa T (A)

Dalam menghitung presentase pembebanan suatu transformator dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\% \text{beban} = \frac{I_{\text{Rata-rata}}}{IFL} \times 100\% \dots\dots\dots(2.4)$$

2.2. Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurnal, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut :

1. Menurut Winda Puspitasari dkk. 2023, dalam jurnal yang berjudul “Manuver Trafo Distribusi di PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Bontang Kota dengan Mutasi Trafo” menyatakan bahwa transformator distribusi merupakan aset penting dalam sistem penyaluran tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi dari sistem transmisi 150 kV menuju konsumen tegangan menengah dan rendah. Penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan kinerja transformator distribusi yang mengalami pembebanan berlebih (overload) dan efisiensi rendah dengan menerapkan metode mutasi trafo. Metode penelitian meliputi pengukuran arus dan tegangan trafo distribusi di lapangan, perhitungan matematis persentase pembebanan, serta evaluasi efisiensi transformator sebelum dan sesudah dilakukan mutasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mutasi trafo efektif dalam menurunkan tingkat pembebanan dan meningkatkan efisiensi transformator. Sebagai contoh, trafo KSB0166 yang sebelumnya memiliki pembebanan sebesar 93% setelah dilakukan mutasi menurun menjadi 74,4%, dan efisiensi meningkat dari 98,17% menjadi 98,50%. Penelitian ini menegaskan bahwa mutasi trafo dapat menjadi solusi teknis yang efisien dan ekonomis untuk menjaga kinerja trafo distribusi tanpa harus melakukan penggantian baru.

2. Menurut Ambraham Latumahina dan Ari Permana L. 2025, dalam jurnal "Analisis Dampak Pembebanan Lebih Transformator Terhadap Penyulang Sulamadaha Gardu GT-SOLBA Ternate Maluku Utara," transformator distribusi memiliki peran penting dalam menjaga keandalan sistem tenaga listrik. Namun, ketika transformator mengalami pembebanan lebih (overload) melebihi kapasitas 80% yang ditetapkan dalam standar SPLN, hal ini dapat menimbulkan berbagai dampak negatif teknis dan ekonomis. Penelitian ini menggunakan metode studi kasus di Gardu GT-SOLBA PT PLN ULP Ternate dengan data operasional tahun 2024, mengukur profil beban harian, arus, tegangan, dan faktor daya menggunakan alat ukur seperti power meter dan clamp meter. Hasil menunjukkan bahwa transformator 160 kVA mengalami pembebanan 100,64% sebelum pengalihan beban, melebihi batas SPLN. Setelah pengalihan beban, pembebanan turun menjadi 43,2%, dengan penurunan beban sebesar 56,8%. Penelitian menegaskan bahwa pengalihan beban (manuver beban) adalah solusi efektif mengatasi overload dan menjaga kontinuitas layanan listrik. Namun, dampak jangka panjang seperti umur isolasi transformator, rugi-rugi daya, dan analisis ekonomi belum dibahas mendalam, menyisakan ruang untuk penelitian lanjutan mengkombinasikan metode uprating, transformator sisipan, dan manuver beban untuk hasil optimal.
3. Menurut I Made Parsa dan Alize Cormidiana Abel. 2024, dalam jurnal yang berjudul "Analisis Metode Uprating Transformator pada Gardu Distribusi terhadap Overload di PT. PLN ULP Kupang" menyatakan bahwa penelitian ini menggunakan metode kuantitatif murni dengan pengumpulan data melalui studi lapangan berupa pengukuran langsung pada transformator distribusi yang mengalami overload. Tujuan penelitian adalah menganalisis pengaruh metode uprating terhadap beban lebih (overload) pada transformator distribusi serta menghitung besar pengaruh metode tersebut sebelum dan sesudah uprating dengan menggunakan analisis statistik IBM SPSS 29.0. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode uprating memiliki pengaruh signifikan terhadap penurunan beban lebih, dengan persentase pengaruh meningkat dari 22,3% sebelum uprating menjadi 53% setelah uprating, serta beban tertinggi turun dari 98,61% menjadi 75,56%. Penelitian ini menegaskan bahwa uprating transformator merupakan solusi efektif dalam mengatasi overload transformator distribusi untuk

menjaga keandalan sistem tenaga listrik dan mengoptimalkan penyaluran daya kepada konsumen.

4. Menurut I Wayan Sugara Yasa dkk. 2023, dalam jurnal berjudul "Mengatasi Overload Pada Transformator Gardu Distribusi Dengan Metode Uprating" menyatakan bahwa penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan pengukuran langsung di lapangan, termasuk pengukuran arus, tegangan, dan daya sebelum dan sesudah dilakukan uprating transformator. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh metode uprating terhadap penurunan beban lebih (overload) dan peningkatan efisiensi transformator pada gardu distribusi di PT. PLN (Persero). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi awal transformator mengalami beban sebesar 95% dari kapasitasnya, yang menyebabkan overload serta risiko kerusakan peralatan akibat panas berlebih. Setelah dilakukan uprating dari kapasitas 200 kVA menjadi 250 kVA, persentase beban menurun menjadi sekitar 73%, sehingga transformator tidak lagi mengalami overload dan berfungsi secara optimal. Analisis rugi-rugi daya dan efisiensi memperlihatkan peningkatan yang signifikan pasca uprating, dengan efisiensi mencapai 97,82%. Hasil ini menunjukkan bahwa metode uprating merupakan solusi efisien dan ekonomis untuk mengatasi masalah overload pada transformator distribusi guna meningkatkan keandalan sistem dan menjaga mutu layanan listrik.
5. Berdasarkan jurnal yang berjudul "Studi Manajemen Trafo PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Sungguminasa" oleh Ashar AR dkk. 2022, penelitian ini menganalisis permasalahan jatuh tegangan dan pembebanan berlebih (overload) pada transformator distribusi GT.SRI024 dengan kapasitas 200 kVA. Metode yang digunakan meliputi perhitungan persentase jatuh tegangan dan simulasi menggunakan ETAP untuk membandingkan dua solusi, yaitu pemasangan transformator sisipan dan uprating transformator. Tujuan penelitian adalah untuk mengevaluasi kehandalan dan efisiensi biaya dari kedua metode tersebut dalam memenuhi standar tegangan SPLN No. 1 Tahun 1995. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan trafo sisipan lebih efektif dalam mengatasi kedua masalah sekaligus, yaitu menurunkan jatuh tegangan dari 21,5% menjadi 6,04% dan mengurangi beban trafo dari 83,7% menjadi 60,2%, sedangkan uprating trafo hanya mampu menurunkan jatuh tegangan hingga 17,1% namun lebih hemat dari segi biaya.

Tabel 2. 1 Hasil Penelitian Sebelumnya

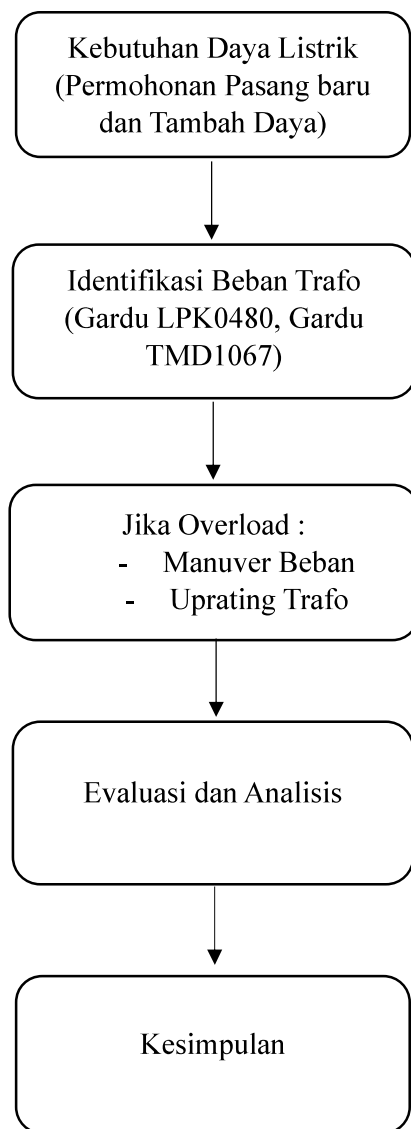
No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1.	“Manuver Trafo Distribusi Di PT. PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Bontang Kota Dengan Mutasi Trafo” (Winda Puspitasari, Arfitariah, Hardianto, 2023)	Trafo distribusi mengalami pembebanan berlebih, efisiensi rendah, dan kenaikan suhu yang berlebihan yang menyebabkan turunnya kemampuan kerja trafo	Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif. Perhitungan matematis dan analisis data pengukuran trafo distribusi, evaluasi pembebanan, efisiensi, dan penentuan trafo yang harus dimutasi.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa Mutasi trafo dapat mengurangi persentase pembebanan dari kondisi overload menjadi normal dan meningkatkan efisiensi trafo; contoh trafo KSB0166 efisiensi naik dari 98,17% menjadi 98,50%	Penelitian ini berfokus pada pelaksanaan Mutasi Trafo untuk mengurangi persentase pembebanan trafo yang berlokasi di PT. PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Bontang Kota
2.	“Analisis Dampak Pembebanan Lebih Transformato Terhadap Penyulang Sulamadaha	Masalah yang dibahas pada penelitian tersebut adalah terjadinya beban lebih pada transformator distribusi di Gardu GT-	Studi kasus dengan pengumpulan data lapangan (arus, tegangan, daya, faktor daya), analisis SPLN, serta	Hasil dari penelitian ini yaitu sebelum pengalihan beban, trafo mengalami pembebanan 100,64% (melebihi batas	Penelitian hanya berfokus pada satu lokasi (GT-SOLBA) dan belum menganalisis dampak jangka panjang

	Gardu Gt-Solba Ternate Maluku Utara” (Ambraham Latumahina, Ari Permana L, 2025)	SOLBA yang menyebabkan penurunan kinerja sistem tenaga listrik, baik dari sisi teknis maupun ekonomi.	penerapan metode pengalihan beban (load transfer).	80%). Setelah pengalihan beban ke trafo GT-Alfamidi, beban turun menjadi 43,2%.	terhadap umur trafo atau rugi-rugi energi sistem distribusi.
3.	“Analisis Metode <i>Uprating</i> Transformator pada Gardu Distribusi terhadap Overload di PT PLN (Persero) ULP Kupang” (I Made Parsa, Alize Cormidiana Abel, 2024)	Penelitian ini membahas masalah tentang terjadinya beban lebih (overload) pada transformator distribusi di wilayah kerja ULP Kupang akibat peningkatan konsumsi listrik, yang menurunkan efisiensi distribusi dan meningkatkan risiko kerusakan trafo.	Metode kuantitatif murni melalui pengukuran lapangan langsung (arus, tegangan, daya sebelum dan sesudah <i>uprating</i>), perhitungan matematis pembebanan trafo, serta analisis statistik menggunakan IBM SPSS 29.0 untuk mengetahui pengaruh	<i>Uprating</i> mampu menurunkan pembebanan dari 98,61% menjadi 75,56%, dengan peningkatan pengaruh terhadap penurunan overload dari 22,3% menjadi 53%, menunjukkan korelasi kuat dan hubungan positif antara <i>uprating</i> dan penurunan beban lebih.	Penelitian hanya menganalisis pengaruh langsung <i>uprating</i> terhadap overload, tanpa membahas dampak jangka panjang (misal: umur trafo, rugi energi, efisiensi ekonomi), serta tidak membandingkan metode lain seperti manuver beban

			uprating terhadap overload.		atau pemasangan trafo sisipan.
4.	“Mengatasi Overload pada Transformator Gardu Distribusi dengan Metode Uprating” (I Wayan Sugara Yasa, I Wayan Dikse Pacane, I Wayan Suriana, 2023)	Penelitian ini bertujuan untuk membahas permasalahan terjadinya beban lebih (overload) pada transformator gardu distribusi KRGK 0136 di PT PLN (Persero) ULP Karang, yang menyebabkan penurunan efisiensi, kenaikan suhu, dan risiko kerusakan isolasi transformator.	Penelitian kuantitatif deskriptif melalui pengukuran langsung arus, tegangan, daya, dan rugi daya sebelum dan sesudah uprating. Perhitungan dilakukan dengan rumus pembebanan, efisiensi, dan jatuh tegangan sesuai standar SPLN dan IEC 60354	Sebelum uprating, pembebanan transformator 95,05% (melebihi batas 80%). Setelah uprating dari 200 kVA menjadi 250 kVA, pembebanan turun menjadi 73%. Efisiensi menurun sedikit dari 98,61% menjadi 97,82%, namun trafo kembali dalam kondisi normal	Penelitian hanya menganalisis satu lokasi tanpa membandingkan metode lain seperti rekonfigurasi jaringan, serta belum mengkaji pengaruh uprating terhadap umur isolasi, rugi daya total sistem, dan analisis ekonominya.
5.	“Studi Manajemen Trafo PT PLN (Persero) Unit	Transformator GT.SRI024 (200 kVA) mengalami beban lebih (83,7%) dan	Penelitian kuantitatif eksperimental dengan pengukuran langsung arus	Setelah pemasangan trafo sisipan, jatuh tegangan berkurang dari 24,9% menjadi	Penelitian belum membahas kombinasi metode uprating dan

Layanan Pelanggan Sunggumin asa” (Ashar AR, Muhammad Thahir, Musfira Thahir, 2022)	jatuh tegangan 21,5% pada ujung JTR, melebihi batas SPLN ($\pm 10\%$). Hal ini menurunkan keandalan sistem distribusi dan kualitas tegangan pelanggan.	dan tegangan sebelum dan sesudah tindakan manajemen trafo. Metode yang diterapkan meliputi pemasangan trafo sisipan dan simulasi ETAP 12.6 untuk membandingkan solusi uprating vs sisipan	6,04%, dan beban turun dari 83,7% menjadi 60,2%. Uprating trafo menurunkan jatuh tegangan menjadi 17,1%. Trafo sisipan lebih efektif secara teknis, sedangkan uprating lebih ekonomis.	manuver beban serta analisis dampak jangka panjang terhadap efisiensi energi, umur transformator, dan keandalan sistem distribusi. Tidak ada analisis biaya investasi total.
--	--	---	--	--

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.6 Kerangka Pemikiran, sumber (Diolah penulis, 2026)

Kerangka berpikir penelitian ini berawal dari meningkatnya kebutuhan daya listrik yang terus bertambah seiring dengan pertumbuhan jumlah pelanggan dan peningkatan konsumsi energi. Kondisi tersebut mengakibatkan transformator distribusi mengalami pembebanan berlebih (overload), seperti yang terjadi pada Gardu LPK0480 dan Gardu TMD1067 di wilayah kerja PT PLN (Persero) ULP Samarinda Ilir. Situasi overload ini berdampak negatif terhadap keandalan sistem, serta menghambat pelayanan

penambahan daya dan pemasangan pelanggan baru, sehingga menimbulkan permasalahan baik dari sisi teknis maupun komersial. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini meninjau dua alternatif solusi utama. Pertama, manuver beban, yaitu langkah pengalihan sebagian beban dari transformator yang mengalami kelebihan beban ke transformator lain yang masih memiliki cadangan daya. Kedua, uprating kapasitas transformator, yakni penggantian transformator yang ada dengan kapasitas yang lebih besar agar mampu menyesuaikan kebutuhan daya saat ini dan proyeksi beban di masa mendatang.

Kedua metode tersebut selanjutnya dievaluasi dan dianalisis secara menyeluruh guna menilai efektivitasnya dalam menurunkan tingkat pembebanan, memperbaiki kualitas tegangan, serta meninjau kelayakan teknisnya. Hasil analisis digunakan untuk membandingkan kondisi beban sebelum dan sesudah penerapan masing-masing solusi, sehingga dapat diketahui tingkat keberhasilannya dalam mengatasi permasalahan *overload*. Akhirnya, dari rangkaian proses tersebut akan diperoleh kesimpulan yang menyeluruh mengenai metode penanganan yang paling tepat, efisien, dan berkelanjutan untuk mengurangi beban lebih transformator, serta dapat mengakomodasi permohonan pelanggan untuk pasang baru listrik dan penambahan daya.