BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

2.1.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Menurut Annisa Purwatiningsih et al (2021), sistem distribusi tenaga listrik adalah bagian sistem tenaga yang berfungsi menyalurkan dan membagikan energi listrik dari Gardu Induk/penyulang kepada konsumen akhir melalui rangkaian gardu distribusi, transformator distribusi, dan jaringan tegangan menengah serta rendah; sistem ini juga bertanggung jawab menjaga kontinuitas pelayanan dan mutu tegangan sesuai standar pelayanan. Pernyataan ini menekankan aspek fungsi operasional (penyaluran), karakteristik topologi (penyulang/gardu), dan metrik keandalan yang biasa dipakai (mis. SAIFI, SAIDI).

Menurut Mangopo (2021), sistem distribusi tenaga listrik didefinisikan sebagai rangkaian yang menghubungkan Gardu Induk (GI) dan instalasi konsumen dimulai dari sisi menengah gardu hingga device pengukuran dan pembatas pada pelanggan sehingga sistem ini menjadi penentu mutu penyaluran dan ketersediaan listrik pada pelanggan. Manopo juga mengklasifikasikan sistem distribusi menjadi dua lapis tegangan: distribusi primer (tegangan menengah) dan distribusi sekunder (tegangan rendah).

2.1.2 Fungsi Jaringan Distribusi Primer dan Sekunder

Menurut Suparmono (2022), jaringan distribusi primer (umumnya 20 kV di Indonesia) berfungsi sebagai penyambung antara Gardu Induk dan gardu-gardu distribusi; fungsinya meliputi penyaluran energi pada level menengah, proteksi

penyulang, dan manuver pengalihan beban ketika terjadi gangguan untuk menjaga kontinuitas layanan. Pada level primer juga ditentukan konfigurasi topologi (*radial, loop, spindle, ring*) yang menentukan keandalan operasi.

Menurut Lubis & Siagian (2024), jaringan distribusi sekunder (tegangan rendah; umum 400/230 V di Indonesia) merupakan bagian yang langsung menghubungkan gardu distribusi ke pelanggan fungsinya adalah menurunkan tegangan menjadi tegangan pakai, menyediakan koneksi satu-fasa atau tiga-fasa ke pelanggan, serta mengakomodasi pengukuran, proteksi sisi rendah, dan manajemen beban lokal. Lubis & Siagian juga menekankan bahwa pemilihan konfigurasi (*radial/loop/spindle*) pada sisi primer berdampak langsung pada kemampuan manuver dan kontinuitas layanan pada sisi sekunder.

2.1.3 Konfigurasi Jaringan Distribusi di PT PLN (Persero)

Menurut Lubis & Siagian (2024), pada studi ULP Pakam, konfigurasi jaringan distribusi di lingkungan PLN bervariasi (*radial, loop, spindle, ring/mesh*), dan pemilihan konfigurasi tersebut didasarkan pada trade-off antara ekonomi (biaya investasi) dan kualitas pelayanan (keandalan, manuver saat gangguan). Penelitian tersebut menunjukkan contoh nyata penerapan kombinasi konfigurasi pada ULP PLN untuk memastikan adanya feeder cadangan dan kemampuan manuver.

Menurut Suganda et al. (2022), dalam praktik operasi PLN, konfigurasi jaringan 20 kV banyak menggunakan pola radial pada area rur al karena ekonomis, sementara area yang menuntut keandalan tinggi (kota, objek vital) cenderung memakai loop, ring, atau spindle untuk menyediakan jalur cadangan dan mengurangi wilayah

terdampak jika terjadi gangguan. Kedua sumber menegaskan pentingnya single line diagram (SLD) dan pembaruan skema manuver untuk menjaga kontinuitas pelayanan.

2.1.4 Karakteristik Beban Pelanggan: Rumah Tangga, Bisnis, dan Sosial

Menurut G. Popa et al (2020), yang membahas smart-grid dan pola konsumsi di Indonesia, pelanggan rumah tangga dominan menggunakan beban satu-fasa (lampu, peralatan rumah tangga, AC kecil) sehingga menimbulkan kecenderungan ketidakseimbangan fase pada trafo distribusi apabila distribusi pelanggan antar fase tidak merata; pola konsumsi juga berfluktuasi (puncak pada malam hari/siang tergantung wilayah).

Menurut Mangopo (2021), pelanggan bisnis dan sosial cenderung memiliki beban yang lebih stabil dibandingkan rumah tangga, dengan variasi beban yang mengikuti jam operasional. Pelanggan bisnis dan sosial tertentu menggunakan beban tiga fasa yang relatif lebih seimbang, namun apabila tidak diatur dengan baik tetap dapat berkontribusi terhadap ketidakseimbangan beban pada jaringan distribusi. Perbedaan karakteristik beban antar kelompok pelanggan inilah yang menjadi salah satu penyebab utama ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi.

2.2 Transformator Distribusi

2.2.1 Definisi dan Fungsi Transformator Distribusi

Menurut Suparmono dkk. (2022), transformator distribusi adalah peralatan listrik statis yang digunakan untuk menurunkan tegangan listrik dari jaringan distribusi tegangan menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah (400/230 V) yang sesuai untuk kebutuhan pelanggan. Transformator distribusi ditempatkan dekat dengan pusat beban

sehingga berfungsi sebagai penghubung langsung antara jaringan distribusi primer dan pelanggan akhir.

Menurut Mangopo (2021), fungsi utama transformator distribusi tidak hanya menurunkan tegangan, tetapi juga menjaga kualitas tegangan, mendistribusikan daya secara merata ke pelanggan, serta meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Karena beroperasi secara kontinu selama 24 jam, transformator distribusi menjadi salah satu komponen paling kritis dalam sistem distribusi.

2.2.2 Prinsip Kerja Transformator

Menurut Setijasa (2023), transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, di mana arus bolak-balik yang mengalir pada kumparan primer akan menghasilkan fluks magnet bolak-balik pada inti besi, sehingga menginduksikan tegangan pada kumparan sekunder. Besarnya tegangan yang dihasilkan bergantung pada perbandingan jumlah lilitan antara kumparan primer dan sekunder. Secara praktis, prinsip ini menghasilkan rumus daya tiga-fasa pada sisi transformator :

$$P_{out} = V_{FN} \times \cos \phi \times (I_R + I_S + I_T)$$

Keterangan :

P_{out} = Daya aktif output total tiga fasa (W)

V_{FN} = Tegangan fasa netral (V)

I_R, I_S, I_T = Nilai arus dari ketiga fasa (A)

Cos ϕ = Faktor daya.

2.2.1 Bagian-bagian Utama Transformator Distribusi

Menurut Suparmono dkk. (2022), bagian utama transformator distribusi terdiri dari inti besi, kumparan, minyak isolasi, dan tangki transformator. Inti besi berfungsi sebagai media penghantar fluks magnet, sedangkan kumparan primer dan sekunder berfungsi sebagai penghantar arus listrik. Minyak transformator berperan sebagai isolasi sekaligus media pendingin.

Menurut S. Sorte et al. (2025), selain komponen utama tersebut, transformator distribusi juga dilengkapi dengan tap changer dan sistem pendingin. Tap changer digunakan untuk mengatur rasio tegangan agar tegangan sekunder tetap berada dalam batas yang diizinkan, sedangkan sistem pendingin (umumnya tipe ONAN pada trafo distribusi PLN) berfungsi menjaga temperatur kerja agar tidak melebihi batas aman. Kondisi fisik dan performa tiap komponen sangat mempengaruhi umur dan keandalan transformator. Komponen-komponen ini bersama-sama menentukan performa dan batas operasi trafo distribusi.

$$P_{Cu} = P_{Cu(FL)} \left(\frac{I_{rata-rata}}{I_{FL}}\right)^2$$

Keterangan :

P_{cu} = Rugi tembaga transformator pada kondisi pembebanan aktual (W)

$P_{Cu(FL)}$= Rugi tembaga transformator pada kondisi beban penuh (W)

$I_{rata\text{-}rata}$ = Arus rata-rata dari setiap fasa (A)

I_{FL} = Arus nominal atau arus beban penuh transformator (A)

2.2.2 Spesifikasi Umum Transformator Distribusi PLN

Menurut Suparmono dkk. (2022), transformator distribusi yang digunakan oleh PT PLN (Persero) umumnya memiliki kapasitas antara 25 kVA hingga 250 kVA

untuk melayani pelanggan rumah tangga, bisnis kecil, dan fasilitas sosial. Transformator tersebut dirancang dengan tegangan primer 20 kV dan tegangan sekunder 400/230 V, serta menggunakan sistem pendingin minyak alami (ONAN).

Menurut Lubis dan Siagian (2024), pemilihan kapasitas transformator distribusi PLN disesuaikan dengan kebutuhan beban puncak, karakteristik pelanggan, dan proyeksi pertumbuhan beban. Transformator dengan kapasitas kecil (25–50 kVA) umumnya digunakan di daerah permukiman dengan kepadatan rendah, sedangkan kapasitas lebih besar (100–250 kVA) digunakan di daerah dengan beban yang lebih padat dan bervariasi.

2.2.3 Parameter Teknis Transformator Distribusi

Menurut Setijasa (2023), parameter teknis utama transformator distribusi meliputi impedansi, rugi inti, rugi tembaga, dan tegangan nominal. Impedansi transformator dinyatakan dalam persen (%) dan mempengaruhi arus hubung singkat serta regulasi tegangan. Rugi inti merupakan rugi tetap yang terjadi akibat histeresis dan arus eddy pada inti besi, sedangkan rugi tembaga merupakan rugi variabel yang bergantung pada arus beban.

2.3 Beban Listrik pada Sistem Distribusi

2.3.1 Jenis Beban (Resistif, Induktif, Kapasitif)

Menurut Jamaaluddin Jamaaluddin et al (2025), beban listrik pada sistem tenaga dibedakan berdasarkan sifat hubungan tegangan-arusnya menjadi resistif, induktif, dan kapasitif; beban resistif (mis. pemanas, lampu pijar) menyerap daya aktif murni sehingga faktor daya mendekati 1, beban induktif (mis. motor, transformator) menghasilkan komponen daya reaktif induktif yang menurunkan faktor daya,

sedangkan beban kapasitif (mis. bank kapasitor) menghasilkan gaya reaktif kapasitif yang dapat mengompensasi daya reaktif induktif.

Menurut Baihaqi (2025), klasifikasi R-L-C juga penting karena perilaku dinamisnya berbeda terhadap harmonisa dan transien; beban non-linier (mesin daya elektronik) walaupun termasuk resistif/induktif dapat menghasilkan harmonisa yang mempengaruhi kualitas daya dan menyebabkan rugi tambahan pada transformator serta menaikkan arus tiap fasa. Oleh karena itu analisis karakteristik beban harus memasukkan aspek nilai cosφ (faktor daya), komponen harmonisa, dan sifat waktu-bergantung beban.

2.3.2 Beban Satu Fasa dan Tiga Fasa

Menurut Rahayu (2023), dalam sistem distribusi trafo distribusi melayani beban satu-fasa (umumnya pelanggan rumah tangga : fasa–netral, 230 V) dan beban tiga-fasa (pelanggan industri/komersial : 400 V antar fasa). Beban satu-fasa yang tersebar tidak merata pada masing-masing fasa menyebabkan ketidakseimbangan beban pada sisi sekunder transformator.

Menurut Mangopo (2021), beban tiga fasa umumnya digunakan oleh pelanggan bisnis, industri kecil, dan fasilitas umum dengan tegangan 400 V antar fasa. Beban tiga fasa yang dirancang dan dioperasikan dengan baik cenderung lebih seimbang, namun ketidakseimbangan tetap dapat terjadi akibat perbedaan pembebanan pada masing-masing fasa atau gangguan operasional.beban.

2.3.3 Pola Konsumsi Beban Pelanggan

Menurut Suhendro & Salis (2024), pola konsumsi pelanggan berbeda-beda menurut segmen : rumah tangga biasanya menunjukkan puncak konsumsi pada malam

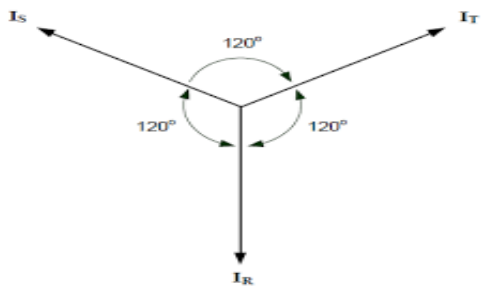
hari (penerangan, elektronik), komersial menunjukkan puncak pada jam kerja siang, sedangkan sosial/layanan publik memiliki pola karakteristik tersendiri (mis. jam operasi rumah sakit). Pemahaman pola ini penting untuk analisis beban puncak, perencanaan kapasitas trafo, dan antisipasi ketidakseimbangan fasa.

2.4 Ketidakseimbangan Beban

2.4.1 Definisi Beban Seimbang dan Tidak Seimbang

Menurut Rohmat (2023), yang dimaksud dengan keadaan beban seimbang pada sistem tenaga listrik tiga fasa adalah suatu kondisi di mana vektor arus atau tegangan memenuhi dua syarat utama, yaitu :

1. Ketiga vektor arus atau tegangan memiliki besar yang sama.
2. Ketiga vektor arus atau tegangan saling membentuk sudut sebesar 120° satu sama lain.

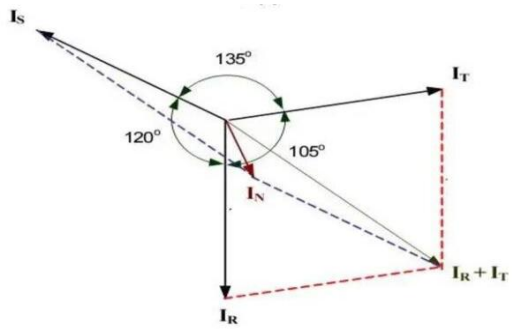


Gambar 2.1 Vektor Diagram Arus dalam Keadaan Seimbang
Sumber : https://share.google/0YsgPUIWCBAJ8QRED

Menurut Sidabutar (2023), secara praktis ketidakseimbangan beban pada jaringan distribusi, khususnya tegangan rendah, merupakan fenomena yang umum terjadi akibat dominasi beban satu fasa pada pelanggan. Sidabutar mengelompokkan kemungkinan kondisi beban tidak seimbang menjadi tiga keadaan, yaitu :

1. Ketiga vektor arus atau tegangan sama besar, tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.

2. Ketiga vektor arus atau tegangan tidak sama besar, tetapi masih membentuk sudut 120° satu sama lain.
3. Ketiga vektor arus atau tegangan tidak sama besar dan juga tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.



Gambar 2.2 Vektor Diagram Arus dalam Keadaan Tidak Seimbang
Sumber : https://share.google/r3kTSv8jr8WaIfFLq

Arus tiga fasa pada suatu sistem yang mengalami kondisi tidak seimbang dapat dianalisis menggunakan metode komponen simetris. Metode ini diperkenalkan oleh Fortescue melalui pembuktian bahwa sistem fasor yang tidak seimbang dapat diuraikan menjadi beberapa sistem fasor yang bersifat seimbang. Sistem fasor seimbang tersebut dikenal sebagai komponen simetris. Penggunaan notasi yang sama seperti pada analisis tegangan memungkinkan diperolehnya persamaan matematis yang merepresentasikan arus pada masing-masing fasa :

$$I_R = I_1 + I_2 + I_0$$

$$I_S = \alpha^2 I_1 + \alpha I_2 + I_0$$

$$I_T = \alpha I_1 + \alpha^2 I_2 + I_0$$

Di mana :

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_R + \alpha I_S + \alpha^2 I_T)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_R + \alpha^2 I_S + \alpha I_T)$$

Keterangan :

I_R, I_S, I_T = Arus fasa R, S, dan T pada sisi sekunder transformator

I_1 = Arus urutan positif (A)

I_2 = Arus urutan negative (A)

α = Sudut fasa transformator 120°

Arus urutan positif merupakan arus yang berasal dari komponen urutan positif, yaitu suatu sistem fasor yang terdiri atas tiga fasor dengan besar yang sama dan terpisah satu sama lain dengan sudut 120°. Susunan urutan fasor pada komponen ini searah dan identik dengan urutan fasor sistem tiga fasa asal, sehingga merepresentasikan kondisi operasi normal pada sistem tenaga listrik.

Arus urutan negatif berasal dari komponen urutan negatif yang juga tersusun atas tiga fasor dengan besar yang sama dan memiliki sudut pemisah sebesar 120°. Perbedaan utama terletak pada arah urutan fasanya, di mana susunan fasor pada komponen urutan negatif berlawanan dengan urutan fasor sistem tiga fasa asal. Keberadaan komponen ini menunjukkan adanya ketidakseimbangan pada sistem.

Arus urutan nol merupakan arus yang berasal dari komponen urutan nol, yang terdiri dari tiga fasor dengan besar yang sama dan tidak memiliki pergeseran sudut fasa satu sama lain. Ketiga fasor tersebut berada dalam kondisi sefasa, sehingga komponen urutan nol umumnya berkaitan dengan arus netral dan sistem tiga fasa empat kawat.

Dalam analisis komponen simetris, simbol α digunakan sebagai operator yang merepresentasikan perputaran fasor sebesar 120° dengan arah berlawanan terhadap arah perputaran jarum jam. Operator ini merupakan bilangan kompleks yang memiliki magnitudo satu dan sudut fasa sebesar 120°. Secara matematis, operator tersebut

didefinisikan sebagai suatu bilangan kompleks satuan yang digunakan untuk menyatakan hubungan sudut antar fasor pada sistem tiga fasa.

2.4.2 Penyebab Ketidakseimbangan Beban pada Jaringan PLN

Menurut Siddik (2024), penyebab utama ketidakseimbangan pada jaringan distribusi antara lain: Distribusi pelanggan yang tidak merata antar fasa (mis. lebih banyak koneksi rumah tangga terpasang pada fasa R daripada S/T), dominan beban satu-fasa pada pelanggan rumah tangga sehingga penambahan pelanggan baru sering menambah beban pada fasa yang sama, dan waktu pemakaian yang tidak serempak (mis. puncak malam hari untuk rumah tangga versus puncak siang untuk komersial) yang menyebabkan variasi beban antar fasa sepanjang hari. Studi lapangan Siddik menunjukkan pola ini sering ditemukan di jaringan JTR/JTM perkotaan dan perumahan.

Menurut Yusiran (2025), selain faktor-faktor di atas, penyebab tambahan meliputi: kesalahan plotting/pemasangan pelanggan pada fasa yang sama (administrasi/teknis), kerusakan atau gangguan pada salah satu fasa (sehingga beban berpindah ke fasa lain), dan pengaruh beban non-linier dan harmonisa (mis. peralatan elektronik/*power electronics*) yang dapat memperburuk pembagian arus antar fasa dan menambah rugi tambahan. Yusiran juga menekankan bahwa faktor manajerial (tidak adanya balancing plan atau rekayasa fase) memperbesar probabilitas ketidakseimbangan.

2.5 Parameter Ketidakseimbangan Beban

2.5.1 Arus per Fasa (I_R, I_S, I_T)

Menurut Rahayu (2023), ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi teridentifikasi melalui perbedaan nilai arus pada tiap fasa: fasa R, S, dan T yaitu I_R, I_S,I_T. Arus per fasa ini diukur secara langsung dengan ampere-meter atau power analyzer pada sisi sekunder trafo untuk mendapatkan kondisi beban nyata pada masing-masing fasa.

2.5.2 Arus Netral (I_N)

Menurut Mangopo (2024), arus netral pada trafo distribusi muncul sebagai akibat langsung dari ketidakseimbangan beban antar fasa: ketika I_R, I_S, I_T tidak sama, maka komponen vektor arus tidak saling meniadakan sempurna menyebabkan arus kompensasi mengalir melalui penghantar netral.

Rumus perhitungan arus netral :

$$I_N = I_R + I_S + I_T$$

Keterangan :

I_N = Arus netral (A), yaitu arus yang muncul akibat ketidakseimbangan beban

I_R, I_S, I_T = Arus fasa R, S, dan T pada sisi sekunder transformator

Menurut Yusiran (2025), arus netral ini penting karena merupakan indikator ketidakseimbangan beban serta faktor utama terjadinya rugi-rugi tambahan di kumparan atau jalur netral transformator (neutral losses), seperti banyak dibahas dalam literatur studi kelistrikan Indonesia.

2.5.3 Arus Beban Penuh Transformator (*Full Load*)

Menurut Darmanaa dkk. (2023), arus beban penuh (full load current) pada transformator distribusi merupakan nilai arus maksimum yang mampu dialirkan oleh transformator sesuai dengan kapasitas daya nominalnya. Perhitungan arus beban penuh digunakan sebagai dasar untuk mengetahui tingkat pembebanan transformator sehingga dapat dievaluasi apakah kondisi operasi transformator masih berada dalam batas kemampuan kerjanya. Nilai arus beban penuh dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_{LL}}$$

Keterangan :

I_{FL} = Arus beban penuh transformator (A)

S = Kapasitas daya transformator (kVA)

V_{LL} = Tegangan fasa-fasa (V)

2.5.4 Persentase Ketidakseimbangan Beban

Menurut Yusiran (2025), besaran ketidakseimbangan beban sering dinyatakan dalam bentuk persentase (percentage unbalance), dihitung dari perbedaan arus fasa termaksimal terhadap arus rata-rata fasa:

$$\% = \frac{|a-1| + |b-1| + |c-1|}{3} \times 100\%$$

Di mana :

$$a = \frac{I_R}{I_{rata}}, b = \frac{I_S}{I_{rata}}, c = \frac{I_T}{I_{rata}}$$

Dengan :

$$I_{rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

Keterangan :

% = Persentase ketidakseimbangan beban (%)

I_{rata} = Rata-rata arus tiga fasa (A)

I_R, I_S, I_T = Arus fasa R, S, T (A)

Dalam penelitian tersebut, ketika persentase unbalance melewati kisaran tertentu, transformator menunjukkan peningkatan arus netral dan losses daya sehingga persentase ini menjadi parameter kuantitatif penting untuk menilai tingkat ketidakseimbangan (baik untuk analisis maupun tindakan koreksi).

2.6 Dampak Ketidakseimbangan Beban

2.6.1 Timbulnya Arus Netral

Menurut Sidabutar (2023), ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat menyebabkan vektor arus tiap fasa tidak saling meniadakan, sehingga menimbulkan arus yang mengalir pada penghantar netral. Pada kondisi beban seimbang, arus netral bernilai nol, sedangkan pada kondisi tidak seimbang arus netral meningkat seiring besarnya perbedaan arus antar fasa.

Menurut Yusiran (2025), arus netral yang timbul akibat ketidakseimbangan beban berkontribusi terhadap peningkatan rugi-rugi daya pada penghantar netral serta transformator distribusi. Arus netral juga menjadi indikator utama terjadinya ketidakseimbangan beban dan sering digunakan sebagai parameter evaluasi kondisi operasi transformator.

2.6.2 Pemanasan Lebih Pada Kumparan Trafo

Menurut Daud (2025), ketidakseimbangan beban menyebabkan sebagian fasa menanggung arus lebih besar sehingga rugi tembaga (I^2R) pada kumparan yang terbeban meningkat lokal efek ini menimbulkan hot-spot (temperatur lokal tinggi) di dalam kumparan yang berisiko merusak bahan isolasi. Rumus rugi tembaga per fasa yang digunakan untuk menunjukkan hubungan ini adalah :

$$P_{Cu} = P_{Cu(FL)} \left(\frac{I_{rata-rata}}{I_{FL}}\right)^2$$

Keterangan :

P_{cu} = Rugi tembaga transformator pada kondisi pembebanan aktual (W)

$P_{Cu(FL)}$= Rugi tembaga transformator pada kondisi beban penuh (W)

$I_{rata\text{-}rata}$ = Arus rata-rata dari setiap fasa (A)

I_{FL} = Arus nominal atau arus beban penuh transformator (A)

Menurut Jatmiko (2024), ketidakseimbangan beban menyebabkan salah satu atau beberapa kumparan transformator memikul arus yang lebih besar dibandingkan kumparan lainnya. Kondisi ini mengakibatkan pemanasan lokal (*hot spot*) pada kumparan akibat meningkatnya rugi tembaga yang bersifat kuadratis terhadap arus.

2.6.3 Kenaikan Rugi-Rugi Daya

Menurut Yusiran (2025), ketidakseimbangan beban meningkatkan rugi-rugi tembaga dan menimbulkan rugi tambahan pada jalur netral dan stray losses; rugi pada penghantar netral dapat dituliskan sebagai :

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N$$

Di mana :

$$R_N = r_{netral} \cdot L$$

Keterangan :

P_N = Rugi daya pada penghantar netral (Watt)

I_N = Arus netral yang muncul akibat ketidakseimbangan beban (Ampere)

R_N = Resistansi penghantar netral (Ω)

r_{netral} = Resistansi penghantar netral per kilometer (Ω/ km)

L = Panjang penghantar netral (km)

sehingga kenaikan I_N menambah kerugian secara kuadratis. Total rugi trafo dapat dinyatakan sebagai:

$$P_{loss} = P_{fe} + P_{cu} + P_N$$

Keterangan :

P_{loss} = Total rugi daya transformator (Watt)

P_{fe} = Rugi inti besi (Watt), diperoleh dari nameplate

P_{cu} = Rugi tembaga (Watt)

P_N = Rugi daya penghantar netral (Watt)

Menurut Ridal (2025), kenaikan rugi-rugi daya akibat ketidakseimbangan beban dapat dihitung secara kuantitatif dengan menjumlahkan seluruh komponen rugi, yaitu rugi inti, rugi tembaga, dan rugi tambahan. Peningkatan rugi-rugi ini berdampak langsung pada efisiensi energi dan biaya operasional sistem distribusi.

2.6.4 Penurunan Efisiensi Transformator

Menurut Yusiran (2025), efisiensi transformator η didefinisikan sebagai rasio daya keluaran terhadap daya masuk (memperhitungkan losses) :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100\%$$

Keterangan :

η = Efisiensi transformator (%)

P_{out} = Daya keluaran transformator (W)

P_{loss} = Total rugi daya (W)

Dengan naiknya P_{loss} akibat $P_{cu,}$ P_N dan P_{add} ketika ketidakseimbangan terjadi, maka efisiensi menurun. Data lapangan pada trafo distribusi menunjukkan penurunan efisiensi beberapa persen pada kondisi imbalance signifikan, yang berpengaruh pada biaya operasi dan kapasitas efektif trafo.

Menurut Buana (2025), penurunan efisiensi juga berimplikasi pada derating operasional operator harus menurunkan batas beban aman atau melakukan redistribusi beban untuk menjaga temperatur dan efektivitas pemanfaatan trafo.

2.7 Standar dan Toleransi Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi tenaga listrik merupakan fenomena yang lazim terjadi, terutama pada jaringan tegangan rendah yang didominasi oleh beban satu fasa. Untuk menjaga kualitas daya, keandalan sistem, dan umur peralatan, terdapat beberapa standar nasional maupun internasional yang menetapkan batas toleransi ketidakseimbangan beban yang diperbolehkan.

2.7.1 SPLN No. 0017:2014

Standar Perusahaan Listrik Negara atau SPLN 0017:2014 merupakan standar internal PT PLN (Persero) yang mengatur tentang *Pedoman Pemeliharaan Transformator Distribusi*. Standar ini menjadi acuan utama bagi seluruh unit PLN dalam mengelola aset transformator distribusi di seluruh Indonesia.

Menurut Hidayat dan Ramli (2020) dalam penelitiannya tentang analisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap susut umur transformator distribusi di

PLN ULP Banda Aceh, SPLN 0017:2014 menetapkan bahwa batas ketidakseimbangan beban yang diizinkan pada transformator distribusi adalah kurang dari 10%. Apabila persentase ketidakseimbangan mencapai atau melampaui 10%, maka transformator tersebut harus masuk dalam program pengawasan dan pemeliharaan rutin, khususnya pada aspek pengukuran beban dan penyeimbangan fasa. Penelitian yang dilakukan pada 5 unit transformator distribusi di Banda Aceh menunjukkan bahwa 3 unit di antaranya beroperasi dengan ketidakseimbangan di atas 10%, dan setelah dilakukan penyeimbangan beban, efisiensi rata-rata meningkat sebesar 0,8%.

2.8 Penelitian Terkait Terdahulu

Tabel 2.1 Penelitian Terkait Terdahulu

No.	Peneliti (singkat)	Tahun	Judul (ringkas)	Hasil penelitian (ringkasan)
1	Sidabutar, R. N.	2023	Studi Pemerataan Beban Transformator Tidak Seimbang pada Jaringan Tegangan Rendah	Penelitian ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi menyebabkan peningkatan arus netral dan rugi-rugi tembaga. Setelah dilakukan pemerataan beban antar fasa, persentase ketidakseimbangan turun secara signifikan dan arus netral berkurang, sehingga efisiensi transformator meningkat.
2	Yusiran, Y.	2025	Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi Transformator Step-Down 20 kV/400 V	Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar ketidakseimbangan beban, semakin besar rugi-rugi daya dan semakin rendah efisiensi transformator. Ketidakseimbangan di atas batas standar menyebabkan penurunan efisiensi yang signifikan serta peningkatan temperatur kumparan.
3	Jatmiko, H. B.	2024	Evaluasi Ketidakseimbangan	Penelitian menemukan bahwa ketidakseimbangan beban

			Beban pada Transformator Distribusi dan Arus Netral	berbanding lurus dengan besarnya arus netral. Arus netral yang tinggi meningkatkan rugi daya pada penghantar netral dan berpotensi mempercepat penuaan isolasi transformator.
4	Soares, F. S. M.	2024	Analisa Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Arus Netral dan Rugi-Rugi Daya.	Studi ini membuktikan bahwa perbedaan arus antar fasa menyebabkan peningkatan rugi-rugi tembaga dan rugi tambahan. Hasil simulasi dan pengukuran lapangan menunjukkan bahwa penyeimbangan beban mampu menurunkan losses secara signifikan.
5	Prasetyo, H. D. Y. P.	2025	Analisis Ketidakseimbangan Beban pada Transformator Distribusi	Penelitian ini menyimpulkan bahwa ketidakseimbangan beban menyebabkan kenaikan temperatur hotspot pada kumparan transformator. Kondisi tersebut mempercepat proses *thermal aging* isolasi dan menurunkan umur teknis transformator.
6	Ridal, Y.	2025	Analisa Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Losses pada Transformator Distribusi	Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban meningkatkan total losses transformator, khususnya rugi tembaga dan stray losses. Nilai losses meningkat seiring bertambahnya selisih arus antar fasa.
7	Suparmono, dkk.	2022	Studi Gangguan Transformator Distribusi pada Jaringan Distribusi 20 kV PT PLN (Persero) Rayon Medan Baru	Penelitian menemukan bahwa salah satu penyebab gangguan transformator distribusi adalah pembebanan tidak seimbang yang menyebabkan overheating dan penurunan keandalan trafo. Pemeliharaan preventif dan penyeimbangan beban direkomendasikan sebagai solusi.
8	Suganda, S., Prasetyo, M. R. A., & Effendi, H.	2022	Analisa Keandalan pada Sistem Distribusi 20 kV	Penelitian ini menyimpulkan bahwa kondisi pembebanan dan ketidakseimbangan pada jaringan distribusi berpengaruh terhadap indeks keandalan sistem. Transformator yang

				mengalami ketidakseimbangan cenderung memiliki tingkat gangguan yang lebih tinggi.
9	Lubis, Z., & Siagian, A.	2024	Analisis Sistem Konfigurasi Jaringan Distribusi Penyulang 20 kV di PT PLN (Persero) ULP Pakam Kota untuk Kehandalan Jaringan Tenaga Listrik	Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi jaringan dan pembagian beban yang tidak optimal dapat menyebabkan ketidakseimbangan beban dan penurunan keandalan sistem distribusi. Optimalisasi konfigurasi dan penyeimbangan beban meningkatkan kualitas pelayanan.
10	Lubis, R. H., & Siregar, I. S.	2023	Analisis Ketidakseimbangan Beban terhadap Arus Netral dan Rugi-Rugi Daya pada Transformator Distribusi 20 kV	Penelitian ini menyimpulkan bahwa ketidakseimbangan beban antar fasa pada transformator distribusi menyebabkan meningkatnya arus netral dan rugi-rugi daya pada sisi sekunder transformator. Hasil pengukuran lapangan menunjukkan bahwa semakin besar selisih arus antar fasa, semakin tinggi rugi tembaga dan rugi daya pada penghantar netral. Penelitian ini merekomendasikan penyeimbangan beban sebagai langkah efektif untuk menurunkan losses dan meningkatkan efisiensi transformator distribusi.