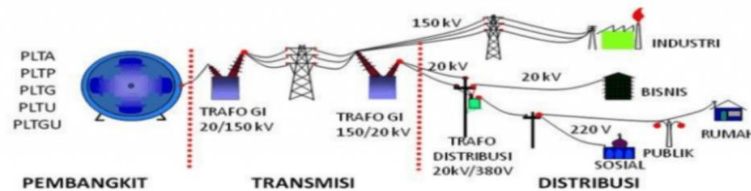


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan infrastruktur vital yang berfungsi untuk menghasilkan, menyalurkan, dan mendistribusikan energi listrik kepada konsumen dengan tingkat keandalan dan kualitas daya yang memadai. Keandalan sistem tenaga harus dijaga agar tetap stabil dan efisien karena gangguan kecil sekalipun dapat berdampak pada menurunnya kualitas penyediaan energi hingga menimbulkan pemadaman. Stabilitas sistem sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kondisi jaringan, keseimbangan beban, serta kemampuan peralatan dalam mempertahankan operasi normal. Oleh karena itu, pemahaman mengenai struktur dan karakteristik sistem tenaga listrik sangat penting untuk mendukung analisis teknis terkait operasi dan gangguan yang terjadi pada jaringan distribusi (Padiyar, 2020).



Gambar 2. 1 Sistem tenaga listrik

Sumber: <https://www.warriornux.com/wp-content/uploads/2016/09/Pembagian-Sistem-Penyaluran-Tenaga-Listrik-768x386.png>

2.1.1 Sistem Pembangkit Tenaga Listrik

Pembangkit listrik adalah bagian awal dari sistem tenaga listrik yang menghasilkan energi listrik melalui berbagai sumber energi, seperti batubara, gas, air (PLTA), panas bumi, surya, maupun angin. Energi yang dihasilkan kemudian dinaikkan tegangannya melalui transformator

step-up sebelum dialirkan ke jaringan transmisi agar rugi daya akibat jarak yang jauh dapat diminimalisasi (*Glover, Sarma, & Overbye, 2022*).

2.1.2 Sistem Transmisi

Sistem transmisi berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit menuju gardu induk dengan tegangan tinggi hingga ekstra tinggi, seperti 70 kV, 150 kV, atau 500 kV. Tegangan tinggi ini dimaksudkan untuk mengurangi rugi daya dan meningkatkan efisiensi penyaluran. Keandalan sistem transmisi sangat dipengaruhi oleh kestabilan tegangan, frekuensi, serta pengaturan aliran daya antar saluran transmisi (*Kundur et al., 2022*).

2.1.3 Sistem Distribusi

Sistem distribusi merupakan bagian akhir dari sistem tenaga listrik yang menyalurkan energi dari gardu distribusi ke konsumen akhir. Pada sistem distribusi tegangan diturunkan ke level menengah (20 kV) dan kemudian diturunkan kembali menjadi tegangan rendah (400/230 V) melalui transformator distribusi. Sistem distribusi memiliki peran vital karena langsung berhubungan dengan pelanggan, sehingga kualitas pelayanan sangat dipengaruhi oleh kondisi jaringan, pemerataan beban antar fasa, dan kualitas peralatan distribusi seperti transformator, kabel, serta proteksi (*Hidayat, T. 2022*).

2.1.4 Kestabilan dan Keandalan Sistem Tenaga Listrik

Keandalan dan kestabilan sistem tenaga listrik menjadi aspek fundamental yang harus dijaga agar sistem dapat beroperasi tanpa gangguan. Kestabilan sistem berkaitan dengan kemampuan jaringan mempertahankan kondisi operasi normal setelah terjadi gangguan, sementara keandalan mencakup kontinuitas suplai listrik kepada pelanggan. Faktor yang memengaruhi kestabilan antara lain frekuensi sistem, tegangan pada setiap level jaringan, keseimbangan beban antar fasa, serta kualitas peralatan yang digunakan (*Padiyar, 2020*).

2.2 Transformator

Transformator distribusi merupakan peralatan listrik yang sangat penting dalam sistem distribusi daya listrik. Fungsinya adalah menurunkan tegangan dari sisi distribusi primer yang biasanya adalah tegangan menengah menjadi tegangan rendah pada sisi sekunder. Jenis trafo distribusi yang sering digunakan adalah trafo step down 20/0.4 kV, di mana tegangan fase dalam sistem JTR adalah 380 Volt. Karena ada penurunan tegangan, maka tegangan pada jaringan TR dibuat lebih dari 380 Volt agar pada ujung beban, tegangan yang diterima tetap 380 Volt. (Suhadi & Purnomo, 2018).



Gambar 2. 2 Trafo

Sumber: <https://www.kibrispdr.org/detail-12/gambar-transformator-distribusi.html>

2.2.1 Komponen-Komponen Transformator Distribusi

Transformator distribusi terdiri atas beberapa komponen utama yang berperan dalam proses transformasi energi listrik dan menjaga keandalan operasinya, yaitu sebagai berikut:

1. Inti Besi (Core)

Inti besi berfungsi sebagai jalur fluks magnet yang dihasilkan oleh lilitan primer. Inti terbuat dari lembaran baja silikon untuk mengurangi rugi-rugi histerisis dan rugi arus eddy.

2. Kumparan Primer dan Sekunder

Kumparan primer berfungsi menerima energi listrik dari jaringan tegangan menengah, sedangkan kumparan sekunder menyalurkan energi listrik ke jaringan tegangan rendah.

Kumparan umumnya terbuat dari kawat tembaga atau aluminium berisolasi.

3. Minyak Transformator (Transformer Oil)

Minyak trafo berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Minyak ini menyerap panas dari kumparan dan inti, kemudian memindahkannya ke permukaan tangki untuk dilepaskan ke udara.

4. Tangki Transformator (Tank)

Tangki berfungsi melindungi komponen internal transformator dan menampung minyak transformator. Tangki dilengkapi sirip pendingin (radiator) untuk meningkatkan proses pelepasan panas.

5. Bushing

Bushing adalah isolator yang digunakan sebagai jalur keluar masuk konduktor dari kumparan ke luar tangki transformator. Bushing primer biasanya untuk tegangan 20 kV, sedangkan sekunder untuk tegangan 400/230 V.

6. Konservator Minyak (Oil Conservator)

Pada beberapa transformator, konservator digunakan untuk menampung pemuaian minyak akibat kenaikan suhu. Komponen ini menjaga kestabilan tekanan minyak dalam tangki utama.

7. Tap Changer

Tap changer digunakan untuk mengatur tegangan sekunder transformator agar tetap stabil meskipun terjadi variasi beban. Pada trafo distribusi, umumnya digunakan **Off Load Tap Changer (OLTC)** yang hanya dapat dioperasikan saat trafo tidak bertegangan.

8. Breather (*Silica Gel*)

Breather berfungsi menyaring uap air dari udara yang masuk ke dalam konservator agar minyak transformator tetap kering dan memiliki kualitas isolasi yang baik.

9. Relai Pelindung (*Protection Devices*)

Pada transformator distribusi, beberapa peralatan proteksi yang digunakan antara lain:

- a) **Buchholz Relay** (untuk trafo dengan konservator)
- b) Temperature Indicator
- c) **Pressure Relief Device (PRD)**
- d) **Fuses** dan **Circuit Breaker** pada jaringan

10. Grounding System

Grounding atau sistem pentanahan digunakan untuk mengamankan peralatan serta melindungi masyarakat dari bahaya tegangan bocor.

2.2.2 Jenis-Jenis Transformator

Transformator memiliki berbagai jenis berdasarkan fungsi, konstruksi, dan penggunaannya.

Pada sistem tenaga listrik, pemilihan jenis transformator sangat berpengaruh terhadap performa penyaluran energi, efisiensi, dan keandalan operasi jaringan. Secara umum, jenis-jenis transformator yang digunakan dalam sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut:

A. Transformator Distribusi

Transformator distribusi digunakan untuk menurunkan tegangan dari jaringan tegangan menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah (400/230 V). Transformator ini ditempatkan

dekat dengan beban dan dirancang untuk bekerja sepanjang waktu dengan fluktuasi beban yang tinggi.

B. Transformator Daya (Power Transformer)

Transformator daya digunakan dalam sistem transmisi bertegangan tinggi hingga ekstra tinggi (70 kV - 500 kV). Trafo ini memiliki kapasitas besar dan berfungsi untuk mentransfer daya antara gardu induk.

C. Transformator Step-Up dan Step-Down

- a) **Step-up** digunakan untuk menaikkan tegangan dari pembangkit listrik menuju sistem transmisi untuk mengurangi rugi daya.
- b) **Step-down** digunakan untuk menurunkan tegangan dari transmisi atau distribusi menuju level tegangan yang lebih rendah.

D. Transformator Tiga Fasa dan Satu Fasa

- a) **Trafo tiga fasa** digunakan pada jaringan distribusi dan transmisi yang membutuhkan kapasitas daya besar.
- b) **Trafo satu fasa** digunakan untuk melayani beban satu fasa seperti rumah tangga atau beban kecil lainnya.

E. Transformator Kering (Dry Type Transformer)

Transformator ini tidak menggunakan minyak sebagai media pendingin, melainkan udara atau resin epoxy. Biasanya digunakan pada instalasi dalam ruangan seperti gedung atau industri yang membutuhkan standar keamanan tinggi.

F. Transformator Berpendingin Minyak (Oil-Immersed Transformer)

Transformator ini menggunakan minyak sebagai media isolasi dan pendingin. Jenis ini paling banyak digunakan pada sistem distribusi dan transmisi karena efisiensinya yang tinggi.

G. Autotransformator

Autotransformator memiliki kumparan tunggal yang digunakan sebagai kumparan primer dan sekunder dengan titik sadapan tertentu. Trafo ini digunakan untuk perbedaan tegangan yang tidak terlalu besar karena lebih efisien dan hemat tembaga.

H. Transformator Instrumentasi (Current Transformer & Potential Transformer)

- a) **Current Transformer (CT)** digunakan untuk menurunkan arus ke nilai yang aman untuk alat ukur dan proteksi.
- b) **Potential Transformer (PT)** digunakan untuk menurunkan tegangan ke level aman untuk alat ukur.

2.3 Jaringan Tegangan Menengah (JTM)

Jaringan Tegangan Menengah (JTM) sering disebut juga jaringan primer distribusi adalah suatu bagian dari tenaga listrik antara gardu induk dan gardu distribusi. Dalam penyaluran tenaga listrik pada jaringan distribusi primer menggunakan 3 sistem saluran diantaranya saluran kawat udara, saluran kabel atau areal cable dan sistem kabel tanah (*Epiwardi, Ruwah Joto, & Muhammad Urfan Barran Rusyda Marzuq. (2023)*)



Gambar 2. 3 Jaringan Tegangan Menengah (JTM)

Sumber: <https://pxhere.com/en/photo/591234>

2.3.1 Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)

Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) merupakan konstruksi termurah yang digunakan untuk penyaluran tenaga listrik pada daya yang sama. Konstruksi ini paling banyak digunakan di Indonesia untuk konsumen jaringan tegangan menengah. SUTM juga disebut jaringan kawat yang tidak berisolasi. Ciri paling utama pada jaringan ini yaitu penggunaan penghantar yang telanjang yang ditopang dengan isolator pada tiang besi atau beton. Bagian-bagian utama dari jaringan ini adalah tiang beton atau besi, Cross Arm serta konduktor. Biasanya konduktor yang digunakan yaitu aluminium atau AAAC yang berukuran 240 mm^2 , 150 mm^2 , 70 mm^2 , dan 35 mm^2 (Haryadi, I. R. M., Karnoto, K., & Santoso, I. (2023)).

2.3.2 Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM)

Konstruksi SKTM atau saluran kabel tegangan menengah ini termasuk konstruksi yang aman dan andal untuk pendistribusian tenaga listrik tegangan menengah, namun relatif mahal untuk penyaluran daya yang sama. Perbandingan dengan SUTM atau saluran

tegangan menengah, menggunakan SKTM akan meminimalkan risiko kegagalan operasi akibat faktor eksternal serta meningkatkan keamanan ketenagalistrikan.

Kabel yang sering digunakan pada jaringan ini adalah berisolasi XLPE. Di mana kabel ini ditanam langsung di tanah pada kedalaman yang ditentukan serta diberikan pelindung terhadap pengaruh mekanisme dari luar. Kabel tanah ini memiliki isolasi yang mampu menahan tegangan tembus yang akan ditimbulkan (*Christiono, C., Fikri, M., Garniwa, I., Sattar, D. M., & Thahara, A. A. (2022)*).

2.4 Perhitungan Daya

Sistem tenaga listrik tiga fasa merupakan sistem yang paling banyak digunakan dalam jaringan distribusi karena memiliki efisiensi tinggi, kemampuan penyaluran daya besar, serta kestabilan yang baik dibandingkan sistem satu fasa. Sistem tiga fasa pada jaringan distribusi aktif terdiri dari tiga penghantar fasa dengan beda sudut 120° , di mana ketidakseimbangan beban antar fasa dapat menyebabkan pergeseran potensial titik netral, tegangan fasa yang tidak normal, serta penurunan efisiensi operasi jaringan secara keseluruhan. Pada beberapa konfigurasi, ditambahkan penghantar netral sebagai jalur pengembalian arus guna menjaga keseimbangan sistem (Guo et al., 2024).

Pada transformator tiga fasa, daya total yang ditransfer merupakan hasil penjumlahan daya pada masing-masing fasa. Hubungan antara tegangan, arus, dan daya dapat dihitung menggunakan persamaan dasar berikut.

2.4.1 Daya Aktif (P)

Daya aktif merupakan daya nyata yang digunakan untuk melakukan kerja sesungguhnya, seperti menggerakkan motor, menyalakan lampu, atau mengoperasikan peralatan elektronik. Daya aktif dinyatakan dengan persamaan:

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos \phi$$

di mana V_L adalah tegangan antar fasa (volt), I_L adalah arus saluran (ampere), dan $\cos \phi$ merupakan faktor daya yang menggambarkan hubungan antara daya aktif dengan daya semu. Semakin besar faktor daya, semakin efisien energi listrik yang digunakan oleh sistem (Nagrath, I. J., & Kothari, D. P. (2010)).

2.4.2 Daya Semu (S)

Daya semu adalah hasil kali antara tegangan dan arus tanpa memperhitungkan sudut fasa di antara keduanya. Besarnya daya semu dinyatakan dengan:

$$S = \sqrt{3} \times V_L \times I_L$$

di mana V_L adalah tegangan antar fasa (volt), I_L adalah arus saluran (ampere).

Daya semu (dalam satuan Volt-Ampere, VA) mencerminkan total energi listrik yang disediakan oleh sistem untuk memenuhi kebutuhan daya aktif dan daya reaktif.

2.4.3 Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif merupakan komponen daya yang tidak menghasilkan kerja nyata, tetapi diperlukan untuk membangkitkan medan magnet dalam peralatan induktif seperti motor dan transformator. Besarnya daya reaktif dapat dihitung menggunakan rumus:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Dimana:

S = Daya Semu

P = Daya Aktif

Satuan daya reaktif adalah Volt-Ampere Reactive (VAR). Semakin besar daya reaktif, semakin rendah faktor daya, yang menyebabkan sistem bekerja kurang efisien (IJEET, (2022)).

2.5 Rugi Daya (Losses)

Rugi daya dalam sistem tenaga listrik adalah kehilangan energi yang tidak dapat dimanfaatkan akibat sifat resistif, induktif, maupun magnetik dari material penghantar dan komponen sistem. Pada transformator, rugi daya utama terbagi menjadi dua, yaitu rugi tembaga (copper loss) dan rugi besi (iron loss).

Rugi tembaga timbul akibat tahanan lilitan yang menghasilkan panas ketika arus mengalir pada masing-masing fasa. Pada kondisi beban tidak seimbang, arus yang mengalir pada tiap fasa (I_R , I_S , dan I_T) tidak sama besar, sehingga rugi tembaga perlu dihitung secara terpisah untuk tiap fasa kemudian dijumlahkan. Menurut Irsyam, Algusri, dan Marpaung (2023), besarnya rugi tembaga pada penghantar tiga fasa dapat dihitung dengan menjumlahkan rugi daya pada tiap fasa menggunakan persamaan I^2R , yaitu:

$$P_R = I_R^2 \times R$$

$$P_S = I_S^2 \times R$$

$$P_T = I_T^2 \times R$$

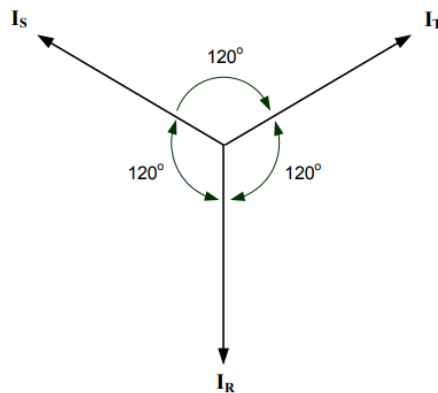
sehingga rugi tembaga total pada ketiga fasa adalah:

$$P_{\text{rugi}} = P_R + P_S + P_T = R \times (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2)$$

Di mana I_R , I_S , dan I_T adalah arus pada masing-masing fasa (ampere), dan R adalah resistansi ekivalen belitan per fasa (ohm) yang diperoleh dari data rugi berbeban penuh (P_{cu}) transformator. Pendekatan ini digunakan karena lebih tepat untuk kondisi beban tidak seimbang dibandingkan bentuk umum $P = 3I^2R$, yang mengasumsikan arus ketiga fasa sama besar. Semakin besar dan semakin tidak merata arus beban antar fasa, semakin tinggi pula rugi tembaga yang terjadi.

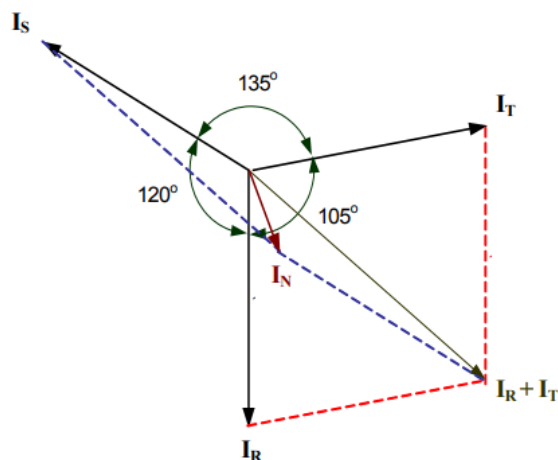
2.6 Ketidakseimbangan Beban (*Load Unbalance*)

Ketidakseimbangan beban (*load unbalance*) adalah kondisi di mana distribusi beban kerja atau daya pada sistem tidak merata di antara beberapa fasa. Hal ini dapat terjadi pada sistem kelistrikan (tegangan dan arus tidak sama di setiap fasa) atau sistem komputasi (satu server menerima beban jauh lebih berat dari server lain) (Nancy, J. J., S, T. M., S, R., Saranraj, & T, V. (2020)).



Gambar 2. 4 vektor diagram arus dalam keadaan seimbang

Pada gambar 2.4 di atas menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (I_N).



Gambar 2. 5 vektor diagram arus yang tidak seimbang

Pada Gambar 2.5 diatas menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya ((I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.

Kondisi ketidakseimbangan beban pada sistem tiga fasa dapat terjadi dalam tiga keadaan. Pertama, ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain. Kedua, ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain. Ketiga, ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.

Ketidakseimbangan beban pada sistem tiga fasa terjadi ketika besar arus atau daya pada tiap fasa tidak sama. Hal ini disebabkan oleh distribusi pelanggan yang tidak merata antar fasa, atau dominasi penggunaan beban satu fasa pada salah satu fasa.

Derajat ketidakseimbangan arus dapat dihitung menggunakan persamaan (*Hafid & Abidin, (2024)*):

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$
$$a = \frac{I_R}{I_{\text{av}}}, \quad b = \frac{I_S}{I_{\text{av}}}, \quad c = \frac{I_T}{I_{\text{av}}}$$
$$\%KB = \left[\frac{|a-1| + |b-1| + |c-1|}{3} \right] \times 100$$

I_R , I_S , I_T dan I_{av} masing-masing adalah arus fasa R, S, T dan arus rata-rata, sedangkan a, b, dan c merupakan rasio arus tiap fasa terhadap arus rata-rata. Menurut **IEEE Std 1159-2009** dan **Peraturan Distribusi PLN**, ketidakseimbangan arus yang diizinkan maksimum **10%**, sedangkan ketidakseimbangan tegangan maksimum **2%**. Jika melebihi batas ini, maka akan meningkatkan rugi daya dan menurunkan efisiensi transformator.

Pengambilan data beban tidak selalu dilakukan secara terus-menerus setiap waktu, melainkan dapat dibatasi pada waktu-waktu tertentu seperti siang dan malam hari, **pemilihan waktu ini didasarkan pada karakteristik pola beban harian sistem distribusi tenaga listrik** (Amelia & Wardoyo, (2025)), di mana siang hari umumnya mencerminkan kondisi beban normal atau menengah, sedangkan malam hari merepresentasikan kondisi beban puncak. Dengan mengambil data pada kedua kondisi tersebut, variasi utama pembebanan sistem sudah dapat terwakili sehingga analisis ketidakseimbangan beban tetap akurat dan relevan. Selain itu, pendekatan ini lebih efisien dari segi waktu, biaya, serta keterbatasan peralatan pengukuran di lapangan, tanpa mengurangi kualitas hasil analisis yang bertujuan untuk mengevaluasi distribusi arus antar fasa dan dampaknya terhadap kinerja jaringan. Penentuan waktu siang dan malam sebagai representasi kondisi beban normal dan beban puncak mengacu pada pola konsumsi listrik harian secara umum. Karena pengukuran tidak dilakukan secara terus-menerus pada masing-masing fasa, penelitian ini tidak dapat memastikan apakah waktu beban puncak (WBP) pada Fasa R, S, dan T terjadi pada jam yang sama atau berbeda, hal ini menjadi salah satu keterbatasan penelitian.

2.7 Dampak Ketidakseimbangan Beban pada Transformator

Ketidakseimbangan beban yang berlangsung dalam jangka panjang memberikan dampak serius terhadap keandalan transformator dan sistem distribusi secara keseluruhan (Ayuningtyas, D., Afandi, A. N., & Sujito, S. (2023)). Beberapa dampak yang umum terjadi antara lain:

1. **Kenaikan arus netral**, yang dapat menyebabkan pemanasan berlebih pada penghantar netral dan titik netral transformator
2. **Pemanasan tidak merata pada belitan transformator**, khususnya pada fasa yang kelebihan beban, sehingga mempercepat degradasi isolasi

3. **Peningkatan rugi daya (losses)**, karena rugi tembaga berbanding lurus dengan kuadrat arus
4. **Penurunan efisiensi transformator**, akibat meningkatnya rugi daya total dan arus yang tidak seimbang
5. **Fluktuasi tegangan antar fasa**, yang dapat mengganggu kestabilan sistem dan memperpendek umur peralatan listrik pelanggan.

2.8 Penelitian Terkait

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Judul Penelitian	Tujuan	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
1.	Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Arus Netral, Rugi Daya, dan Efisiensi Transformator Distribusi (H. Hartono, 2023)	Mengetahui hubungan ketidakseimbangan beban terhadap rugi daya dan efisiensi transformator distribusi PLN.	Pengukuran langsung arus, tegangan, daya, serta perhitungan efisiensi pada kondisi siang dan malam.	Terjadi kenaikan rugi daya sebesar 9,34% pada kondisi tidak seimbang dan penurunan efisiensi rata-rata sebesar 3,7%.
2.	Analisis Rugi-rugi Akibat Ketidakseimbangan Beban pada Transformator Distribusi 2000 kVA (R. S. Widagdo, 2022)	Menganalisis besar rugi daya akibat ketidakseimbangan beban pada trafo 2000 kVA di jaringan distribusi.	Metode observasi lapangan dengan pengukuran arus per fasa dan perhitungan rugi daya.	Ditemukan rugi daya meningkat 12% ketika ketidakseimbangan arus mencapai 8%, dan arus netral naik hingga 20 A.
3.	Analisis Ketidakseimbangan Beban pada Transformator Distribusi (E. Suyandi, 2017)	Menilai tingkat ketidakseimbangan beban dan dampaknya terhadap kinerja trafo distribusi di wilayah PLN.	Pengukuran langsung arus, tegangan, serta perhitungan faktor ketidakseimbangan berdasarkan standar SPLN 72:1987.	Tingkat ketidakseimbangan arus rata-rata 11% menyebabkan peningkatan rugi tembaga dan suhu operasi transformator.
4.	Analisis Ketidakseimbangan Beban pada Transformator di Fakultas Teknik (D. A. Siboro, 2019)	Mengidentifikasi besar ketidakseimbangan beban dan efeknya terhadap efisiensi transformator kampus.	Studi kasus dengan pengukuran lapangan serta analisis daya per fasa	Ketidakseimbangan beban mencapai 13%, mengakibatkan efisiensi transformator turun

				dari 97% menjadi 93%.
5.	Studi Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Rugi-rugi pada Transformator Distribusi MA 01 (M. N. Pahlawan, 2020)	Mengetahui besarnya rugi tembaga dan besi akibat ketidakseimbangan beban	Metode eksperimental dengan pengukuran arus dan tegangan tiap fasa selama 24 jam.	Ketidakseimbangan beban di atas 10% meningkatkan rugi tembaga hingga 1,2 kali dari kondisi normal.
6.	Analisa Ketidakseimbangan Beban pada Transformator Distribusi (H. Widiarto, 2021)	Mengevaluasi pengaruh ketidakseimbangan terhadap parameter daya dan kualitas tegangan.	Studi lapangan dengan pencatatan data dan analisis statistik ketidakseimbangan.	Ketidakseimbangan arus rata-rata 9,8% berpengaruh pada fluktuasi tegangan antar fasa $\pm 3\%$
7.	Analisis kegagalan trafo distribusi dan usulan perbaikan solusi (A.Wondwossen, 2023)	Menentukan penyebab utama kegagalan transformator distribusi dan memberikan rekomendasi teknis pencegahan.	Analisis data kerusakan dan beban tidak seimbang pada jaringan 15 kV Ethiopia	36% kegagalan transformator disebabkan oleh beban tidak seimbang; solusi redistribusi dan pemantauan beban berkala direkomendasikan.
8.	KetidakSeimbangan Tiga Fasa pada system Distribusi (M.T.Bima, 2018)	Menentukan indikator kuantitatif ketidakseimbangan dalam sistem distribusi dan efeknya terhadap efisiensi daya.	Analisis matematis dan simulasi sistem distribusi menggunakan model beban acak.	Faktor ketidakseimbangan sebesar 5% dapat menurunkan efisiensi sistem hingga 1,8%, terutama pada beban induktif tinggi.
9.	Analisis Rugi Daya Akibat Ketidakseimbangan Beban pada Transformator 2000 kVA di Supermall Mansion 2 Tower Tanglin Surabaya (Widagdo dkk., 2023)	Menentukan besarnya rugi daya pada transformator 2000 kVA akibat ketidakseimbangan beban.	Pengukuran arus tiap fasa, arus netral, rugi daya, dan efisiensi transformator distribusi secara langsung di lapangan.	Hasil menunjukkan ketidakseimbangan beban sebesar 11,66% pada siang hari dan 10,33% pada malam hari, dengan rugi tembaga masing-masing sebesar 91,3 kW dan 94,2 kW. Ketidakseimbangan

				beban terbukti meningkatkan rugi daya dan menurunkan efisiensi transformator.
10.	Estimasi Biaya Rugi Daya Akibat Ketidakseimbangan, Tanpa Beban, dan Beban pada Transformator Tahun 2023 (Liliana dkk., 2024)	Menghitung total rugi daya dan biaya akibat ketidakseimbangan beban, rugi tanpa beban, dan rugi berbeban pada transformator selama periode 10 tahun.	Analisis data rugi daya dan perhitungan biaya menggunakan model prediktif berdasarkan kondisi operasi transformator pada sistem distribusi kampus.	Hasil menunjukkan bahwa rugi daya terbesar disebabkan oleh ketidakseimbangan beban, yaitu mencapai 88,68% dari total rugi daya selama 10 tahun. Penelitian merekomendasikan pemerataan beban antar fasa untuk menekan rugi daya dan biaya operasional.