

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Dalam konteks penyediaan energi listrik, sistem tenaga listrik berperan sebagai satu kesatuan yang terintegrasi untuk memastikan proses penyaluran energi listrik mulai dari pembangkit hingga ke konsumen dapat berjalan secara optimal. Sistem tenaga listrik merupakan sekumpulan pusat pembangkit listrik dan gardu induk (pusat beban) yang saling terhubung melalui jaringan transmisi dan distribusi sehingga membentuk suatu sistem yang terinterkoneksi. Secara umum, sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama, yaitu pusat pembangkit listrik, saluran transmisi, dan sistem distribusi (Sheto Pamungkas, 2022).

Gambar 2.1 memperlihatkan sisten tenaga listrik mulai dari pembangkit sampai ke pelanggan.



Gambar 2.1 Ruang Lingkup Sistem Tenaga Listrik

Sumber: <https://share.google/images/sKQ9nBPXjPoJWenAA>

2.2 Transformator

Transformator merupakan perangkat listrik yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, di mana dua kumparan atau lebih saling berinteraksi melalui medan magnet. Salah satu kumparan terhubung ke sumber tegangan AC yang menghasilkan fluks magnet yang kemudian menginduksi tegangan di kumparan lainnya sesuai jumlah lilitan (Darwanto, 2021). Transformator dapat dibagi menurut fungsi/pemakaian seperti:

1. Transformator Mesin (Pembangkit)
2. Transformator Gardu Induk
3. Transformator Distribusi, Penggunaan transformator pada sistem penyaluran tenaga listrik dapat dibagi :
 - a. Trafo penaik tegangan (Step up) atau disebut trafo daya, untuk menaikkan tegangan pembangkit menjadi tegangan transmisi.
 - b. Trafo penurun tegangan (Step down), dapat disebut trafo distribusi, untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi.

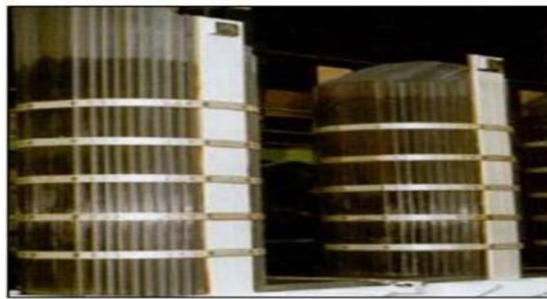
2.3 Bagian Transfotmator

2.3 1 Inti Besi

Inti besi transformator terdiri dari lapisan pelat besi silikon yang dilengkapi dengan lapisan isolasi yang sangat tipis pada salah satu sisinya. Lapisan isolasi tersebut dirancang untuk tahan terhadap suhu tinggi dan memiliki koefisien

konduksi panas yang rendah, dengan ketebalan yang sangat kecil guna meminimalkan rugi-rugi pada inti. Susunan pelat ini membentuk luasan inti magnetis yang kuat dan efisien.

Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, magnetik yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh Eddy Current (Jeckson et al., 2022).



Gambar 2.2 Inti Besi Transformator

Sumber: <https://share.google/images/iQGxTBE4x25hRudW4>

2.3 2 Kumparan

Transformator distribusi terdiri dari 2 kumparan yang digulung pada satu inti besi. Kumparan ini berhubungan secara elektrik, melainkan secara magnetis melalui suatu fluks magnet yang berada didalam inti besi transformator. Salah satu kumparan ini dihubungkan pada sumber energi listrik, kumparan ini disebut kumparan primer. Sedangkan kumparan kedua dihubungkan pada beban dan kumparan ini disebut kumparan sekunder (Partaonan et al., 2019).



Gambar 2.3 Kumparan Transformator

Sumber: <https://share.google/images/XUYHSRGyft4cOWqhV>

2.3 3 Minyak Transformator

Minyak transformator merupakan salah satu bahan isolasi cair yang berfungsi sebagai isolasi dan pendingin pada transformator. Sebagian bahan isolasi minyak harus memiliki kemampuan untuk menahan tegangan tembus, sedangkan sebagai pendingin minyak transformator harus mampu meredam panas yang ditimbulkan, sehingga dengan kedua kemampuan ini maka minyak transformator diharapkan mampu melindungi transformator dari gangguan (Robitul et al., 2022).

2.3 4 Bushing

Bushing Hubungan antara kumparan transformator dengan jaringan luar melalui sebuah bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Bushing sekaligus berfungsi sebagai penyekat/isolator antara konduktor tersebut dengan tangki transformator. Pada bushing dilengkapi fasilitas untuk pengujian kondisi bushing yang sering disebut center tap (Jeckson et al., 2022).



Gambar 2.4 Bushing

Sumber: <https://share.google/images/Vh304QvH07kHBggZe>

2.3 5 Tap Changer

Tap changer merupakan sebuah alat yang bekerja dengan cara merubah perbandingan lilitan dalam sebuah transformator untuk mendapat tegangan keluaran yang normal. Dalam sebuah tap changer, terdapat posisi-posisi tap untuk mendapatkan tegangan keluaran yang optimal sesuai dengan tegangan primer. Semakin kecil tegangan primer yang diterima maka semakin besar posisi yang disetting pada sebuah tap changer (Sampeallo et al., 2018).

Ada dua cara pengoperasian tap changer yaitu :

1. Tap changer yang dioperasikan pada keadaan transformator tidak bertegangan (Off Load Tap Changer) yang hanya dapat dioperasikan secara manual.
2. Tap changer yang dioperasikan pada keadaan transformator berbeban (On Load Tap Changer) yang dapat dioperasikan secara manual maupun otomatis.

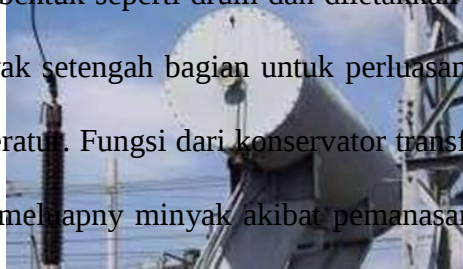


Gambar 2.5 Tap Changer

Sumber: <https://share.google/images/cZf6uqXyGAyh5ltdi>

2.3 6 Konservator

Konservator Transformator Konservator merupakan tabung berisi minyak transformator yang diletakkan pada bagian atas tangki. Ini adalah bagian penting transformator yang tidak dapat dilewatkan. Konservator biasanya terbuat dari material logam dengan bentuk seperti drum dan diletakkan di atas transformator. Konservator terisi minyak setengah bagian untuk perluasan dan kontraksi ketika terjadi perubahan temperatur. Fungsi dari konservator transformator adalah untuk menjaga ekspansi atau meluapnya minyak akibat pemanasan dan sebagai saluran pengisian minyak (Winayu Siswanto et al., 2022).



Gambar 2.6 Konservator

Sumber: <https://share.google/images/AEhwiFTv85XKeGgCo>

2.3 7 Pendingin

Peralatan Bantu Pendinginan Transformator Pada inti besi dan kumparan – kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi tembaga. Maka panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, ini akan merusak isolasi, maka

untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut transformator perlu dilengkapi dengan alat atau sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator (Jeckson et al., 2022), media yang dipakai pada sistem pendingin dapat berupa:

1. Udara/gas.
2. Minyak.
3. Air.

Sedangkan pengalirannya (sirkulasi) dapat dengan cara:

1. Alamiah (natural).
2. Tekanan/paksaan.

Tabel 2.1 Macam – Macam Sistem Pendinginan Transformator

No	Macam Sistem Pendinginan	Media			
		Dalam Transformator		Luar Transformator	
		Sirkulasi alamiah	Sirkulasi paksa	Sirkulasi alamiah	Sirkulasi paksa
1	AN	-	-	Udara	-
2	AF	-	-	-	Udara

3	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5	OFAN	-		Udara	-
6	OFAF	-		-	Udara
7	OFWF	-		-	Air
8	ONAN dan ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9	ONAN dan OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10	ONAN dan OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11	ONAN dan OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

Sumber: <https://engineeringbuilding.blogspot.com/2011/08/transformator-daya.html>

2.4 Prinsip Kerja Transformator

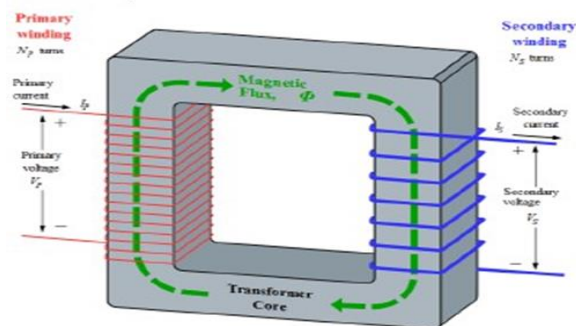
Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi bersama, yaitu ketika arus bolak-balik pada kumparan primer menghasilkan fluks magnetik yang mengalir melalui inti besi dan menginduksi tegangan di kumparan sekunder. Jika salah satu kumparan dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, fluks bolak-balik timbul di dalam inti besi yang dihubungkan dengan kumparan yang lain menyebabkan atau menimbulkan ggl (gaya gerak listrik) induksi (sesuai dengan induksi elektromagnet) dari hukum Faraday.

Berdasarkan hukum Faraday yang menyatakan magnitudo dari electromotive force (emf) proporsional terhadap perubahan fluks terhubung. Hukum Lorentz

menjelaskan bahwa arus bolak – balik yang beredar mengelilingi inti besi mengakibatkan inti besi tersebut berubah menjadi magnet, apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu lilitan maka lilitan tersebut akan memiliki perbedaan tegangan pada kedua ujung lilitannya (Fauji et al., 2023).

Prinsip kerja transformator melibatkan bagian – bagian utama pada transformator, yaitu : belitan primer, belitan sekunder dan inti besi transformator. Belitan tersebut mengelilingi inti besi dalam bentuk lilitan.

Apabila belitan pada sisi primer transformator dihubungkan dengan suatu sumber tegangan bolak – balik sinusoidal (V_p), maka akan mengalir arus bolak – balik yang juga sinusoidal (I_p) pada belitan tersebut. Arus bolak – balik ini akan menimbulkan fluks magnetik (Φ) yang sefasa dan juga sinusoidal di sekeliling belitan. Akibat adanya inti besi transformator yang menghubungkan belitan pada sisi primer dan belitan pada sisi sekunder, maka fluks magnetik akan mengalir bersama pada inti besi transformator dari belitan primer menuju belitan sekunder sehingga akan mengakibatkan tegangan induksi pada sisi sekunder transformator (Tiasmoro et al., 2021).



Gambar 2.7 Prinsip Kerja Transformator

Sumber: <https://share.google/images/7hBEw3ydlH8laVuHU>

2.5 Jenis Daya Pada Transformator

Daya listrik didefinisikan sebagai laju hantaran energi listrik dalam sirkuit listrik. Satuan SI daya listrik adalah watt yang menyatakan banyaknya tenaga listrik yang mengalir per satuan waktu (joule/detik) (Ardian Rohman, 2022). Daya Listrik dapat dibagi menjadi 3 macam yang dikenal dengan segitiga daya yang di kemukakan oleh Sheto Pamungkas (2022), yaitu sebagai berikut :

1. Daya Nyata (P)

Daya nyata merupakan daya listrik yang digunakan untuk keperluan menggerakkan mesin-mesin listrik atau peralatan lainnya.

2. Daya Semu (S)

Daya semu merupakan daya listrik yang melalui suatu penghantar transmisi atau distribusi. Daya ini merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang melalui penghantar.

3. Daya Reatif (Q)

Daya reaktif merupakan selisih antara daya semu yang masuk pada penghantar dengan daya aktif pada penghantar itu sendiri, dimana daya ini terpakai untuk daya mekanik dan panas. Daya reaktif ini adalah hasil kali antara besarnya arus dan tegangan yang dipengaruhi oleh faktor daya.

Dari penjelasan ketiga macam daya diatas tersebut, dikenal juga dengan Segitiga Daya. Dimana Pengertian umum dari Segitiga Daya adalah suatu

hubungan antara daya nyata, daya semu, dan daya reaktif, yang dapat dilihat hubungannya pada gambar 2.8 :



Gambar 2.8 Segitiga Daya

Sumber: <https://share.google/images/tmkhyYyMdJXBCvhhl>

Keterangan :

$$P = S \times \cos \phi \text{ (Watt)}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ (VA)}$$

$$Q = S \times \sin \phi \text{ (VAR)}$$

2.6 Rugi – Rugi Transformator

Rugi-rugi pada transformator mencakup rugi inti atau rugi besi, serta rugi tembaga yang muncul di kumparan primer dan sekunder. Pengurangan rugi besi dapat dicapai melalui pemilihan inti besi dengan luas penampang yang memadai, sehingga fluks magnet dapat mengalir dengan lancar di dalamnya. Adapun untuk menekan rugi tembaga, diperlukan penggunaan kawat tembaga yang memiliki luas penampang cukup besar guna menyalurkan arus listrik yang dibutuhkan. Rugi-rugi transformator terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi inti besi.

2.6 1 Rugi Tembaga

Rugi-rugiyang disebabkan oleh arus mengalir pada kawat tembaga. Rugi-rugi tembaga akan berbanding lurus dengan besarnya beban sehingga meningkatnya arus beban akan meningkatkan rugi-rugi tembaga juga (Elnizar et al., 2021). Rugi tembaga dirumuskan secara matematis yang di kemukakan oleh juga Elnizar et al. (2021). sebagai berikut

$$P_{cu} = I^2 R \text{ (Watt)} \quad (2.1)$$

Keterangan:

P_{cu} : Rugi Tembaga (Watt)

I : Arus Yang Mengalir Pada Pegantar (Ampere)

R : Hambatan (Ohm)

2.6 2 Rugi Inti Besi

Rugi inti pada transformator dibagi atas dua bagian, yaitu rugi hysteresis dan arus eddy yang dapat diukur melalui percobaan/test tanpa beban, dimana pada saat tanpa beban rugi hysteresis yaitu rugi yang disebabkan oleh fluks bolak-balik pada inti besi, sedangkan rugi arus eddy, yaitu rugi yang disebabkan oleh arus pusar pada inti besi. Rugi – rugi besi terdiri atas dua yang di kemukakan oleh Elnizar et al.,(2021) sebagai berikut:

1. Rugi Hysterisis (Pe)

Rugi hysteresis adalah rugi yang diakibatkan oleh fluks (Φ) bolak-balik di inti besi. Pada besi yang mendapat fluks bolak-balik, Rugi hysteresis per cycle berbanding dengan luas lup (jerat) hysteresis.

2. Rugi-rugi Arus Eddy

Rugi-rugi ini disebabkan pemanasan pada ketebalan inti besi oleh arus yang terinduksi pada inti dan perbedaan tegangan antara sisinya maka akan membangkitkan arus yang berputar – putar pada sisi yang luas/tebal. Impedansi dari inti yang di aliri arus dapat dianggap konstan untuk laminasi yang tipis dan tidak tergantung pada frekuensi, untuk frekuensi rendah atau frekuensi daya listrik.

2.7 Beban Puncak

Waktu beban puncak adalah waktu dimana pemakaian listrik sedang berada di puncaknya. Waktu beban puncak terjadi yaitu antara pukul 17.00 WIB sampai dengan 23.00 WIB. Di antara waktu tersebut pemakaian listrik memang sedang di puncaknya dikarenakan konsumen rumah tangga sudah berada di rumah dan melakukan aktifitas yang tak terlepas dari pemakaian peralatan yang membutuhkan sumber listrik. Waktu beban puncak berakhir di jam 23.00 WIB ketika konsumen rumah tangga sudah mematikan semua lampu dan peralatan rumah tangga dan beristirahat malam hari atau tidur (Dwipayana et al., 2020).

Beban puncak sendiri secara teknis menggambarkan jumlah maksimum daya listrik yang dikonsumsi oleh sistem atau konsumen pada saat tertentu dalam kurva

beban harian, yaitu nilai puncak dari permintaan daya selama periode waktu tertentu yang sering kali menjadi tolok ukur dalam perencanaan dan pengoperasian jaringan tenaga listrik untuk memastikan kapasitas trafo dan jaringan mampu melayani beban tanpa terjadi kegagalan atau *overload*. Definisi ini menunjukkan bahwa beban puncak tidak hanya sekadar waktu puncak penggunaan, tetapi merupakan momen nilai daya tertinggi yang tercapai dalam interval waktu tertentu yang biasanya diukur setiap 15–30 menit dalam studi teknik listrik (Ismarala et al., 2018).

Dalam sistem listrik arus bolak-balik (AC), komponen daya yang paling penting dalam evaluasi beban puncak adalah daya nyata (*active/real power*), yaitu daya yang benar-benar dikonsumsi dan digunakan untuk melakukan kerja, seperti menyalakan lampu atau menggerakkan motor. Daya nyata ini dirumuskan secara matematis yang di kemukakan oleh Ismarala et al. (2020) sebagai berikut:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \quad (2.2)$$

Keterangan :

P = Daya Nyata (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus Yang Mengalir Pada Penghantar (Ampere)

$\cos \phi$ = Faktor Daya

Faktor daya atau $\cos \phi$ menggunakan nilai 0,8. Nilai tersebut di gunakan sebagai acuan dalam Statistik PLN, pada perhitungan demand factor, PLN mencantumkan $\cos \phi = 0,8$ dan merujuk pada SE Direksi PLN Nomor 006/PST/88 (PT PLN, 2024).

Beban puncak (peak load) dalam sistem tenaga listrik sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik teknis maupun non-teknis. Berikut adalah beberapa faktor utamanya:

1. Waktu dan Pola Aktivitas Konsumen

Beban puncak umumnya terjadi pada pagi dan malam hari, seiring meningkatnya aktivitas masyarakat seperti penggunaan alat elektronik, penerangan, dan peralatan rumah tangga. Untuk sektor industri, beban puncak sering terjadi pada jam-jam kerja utama.

2. Kondisi Cuaca dan Musim

Suhu lingkungan berperan besar terhadap penggunaan alat-alat pemanas atau pendingin. Pada musim kemarau atau musim panas, penggunaan AC meningkat; sedangkan pada musim hujan atau dingin, pemanas lebih sering digunakan, yang menyebabkan lonjakan konsumsi daya.

3. Jenis dan Jumlah Pelanggan

Wilayah dengan dominasi pelanggan rumah tangga akan memiliki pola beban puncak yang berbeda dengan wilayah industri atau komersial.

Semakin banyak pelanggan aktif dalam satu wilayah distribusi, semakin besar kemungkinan beban puncak terjadi secara bersamaan.

4. Pertumbuhan Ekonomi dan Urbanisasi

Peningkatan jumlah penduduk, pembangunan pemukiman, pusat perbelanjaan, dan industri baru secara langsung meningkatkan konsumsi energi listrik, yang memperbesar potensi beban puncak.

5. Kebiasaan Konsumsi Energi yang Tidak Efisien

Kurangnya kesadaran penggunaan energi secara efisien, seperti menyalakan banyak alat elektronik secara bersamaan tanpa manajemen beban, turut memicu lonjakan permintaan daya secara tiba-tiba.

6. Gangguan atau Pemeliharaan Jaringan

Perpindahan beban ke trafo atau feeder lain saat terjadi gangguan atau pemeliharaan bisa menyebabkan konsentrasi beban berlebih pada satu titik, sehingga meningkatkan beban puncak lokal.

Salah satu penyebab utama beban puncak adalah meningkatnya kebutuhan energi listrik rumah tangga secara bersamaan pada jam-jam tertentu, terutama pada malam hari, yang berdampak langsung terhadap efisiensi sistem distribusi (Sutawinaya, 2022).

Pola beban harian dan mingguan menggambarkan fluktuasi permintaan daya listrik dalam periode waktu tertentu yang biasanya berulang. Pola ini sangat penting dalam perencanaan dan pengoperasian sistem distribusi karena menunjukkan kapan terjadi beban puncak dan kapan sistem berada pada beban minimum.

1. Pola Beban Harian

- a Secara umum, pola beban harian pada sistem distribusi menunjukkan tiga fase utama:
- b Beban rendah (off-peak): Biasanya terjadi pada dini hari (sekitar pukul 00.00–05.00) saat aktivitas konsumen sangat rendah.
- c Beban naik cepat (morning rise): Dimulai sekitar pukul 06.00 seiring dimulainya aktivitas rumah tangga, perkantoran, dan industri ringan.
- d Beban puncak (peak load): Umumnya terjadi pada malam hari antara pukul 17.00–22.00, ketika aktivitas rumah tangga memuncak (penggunaan alat elektronik, lampu, pemanas air, dll).

2. Pola Beban Mingguan

Pola beban mingguan biasanya menunjukkan perbedaan beban antara hari kerja dan akhir pekan:

- a Hari kerja (Senin–Jumat): Beban cenderung lebih tinggi karena aktivitas industri, perkantoran, dan komersial berjalan normal.

- b Akhir pekan (Sabtu–Minggu): Beban umumnya lebih rendah, kecuali di daerah wisata atau pusat perbelanjaan, di mana beban tetap tinggi bahkan meningkat.

Beban puncak harian umumnya terjadi pada malam hari, dan beban pada akhir pekan cenderung lebih rendah dibanding hari kerja. Pola ini berulang secara konsisten dan menjadi dasar dalam evaluasi efisiensi trafo distribusi (Husein et al., 2022).

Beban puncak yang melebihi kapasitas nominal transformator distribusi dapat menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap kinerja dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Berikut beberapa dampak utamanya:

1. Peningkatan Rugi-rugi Daya (Losses)

Saat beban meningkat, arus yang mengalir dalam kumparan transformator juga meningkat, sehingga rugi-rugi tembaga (I^2R losses) bertambah secara signifikan. Ini mengurangi efisiensi operasional transformator.

2. Penurunan Efisiensi Transformator

Transformator memiliki titik kerja optimal pada beban tertentu. Jika transformator bekerja terlalu dekat atau melebihi kapasitasnya saat beban puncak, efisiensinya akan menurun karena meningkatnya losses.

3. Peningkatan Suhu Operasi

Arus yang tinggi selama beban puncak menghasilkan panas lebih besar. Jika pendinginan tidak memadai, suhu ini dapat melebihi batas normal dan

mempercepat degradasi isolasi transformator, bahkan memicu trip proteksi.

4. Pengurangan Umur Pakai

Operasi berlebih secara terus-menerus pada saat beban puncak mempercepat keausan komponen internal, terutama pada sistem insulasi, yang akhirnya memperpendek usia transformator.

5. Gangguan Kualitas Daya

Beban berlebih dapat menyebabkan penurunan tegangan (voltage drop) dan fluktuasi daya yang memengaruhi stabilitas pasokan ke konsumen.

6. Pemicu Gangguan Sistem

Beban puncak yang tinggi berpotensi menyebabkan *overload* dan trip pada sistem proteksi, bahkan dapat memicu kegagalan transformator atau padamnya sebagian wilayah distribusi.

Transformator yang beroperasi pada beban puncak cenderung mengalami kerusakan lebih cepat dibandingkan dengan yang beroperasi pada beban normal. Oleh karena itu, manajemen beban menjadi penting untuk menjaga umur dan kinerja transformator serta mengurangi risiko kerusakan (Husein et al., 2022).

Hubungan antara beban puncak dan rugi daya juga menjadi perhatian utama dalam sistem distribusi. Rugi daya yang terjadi selama proses distribusi dapat meningkat seiring dengan meningkatnya beban puncak. Peningkatan beban puncak dapat menyebabkan peningkatan rugi daya yang signifikan, yang pada

gilirannya berdampak pada efisiensi energi secara keseluruhan. Pengelolaan beban puncak yang efektif dapat membantu mengurangi rugi daya dan meningkatkan efisiensi sistem.

Dalam konteks efisiensi energi, beban puncak yang tinggi dapat mengakibatkan pemborosan energi dan biaya operasional yang lebih tinggi. Dengan mengelola beban puncak secara efektif, perusahaan listrik dapat meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi biaya. Hal ini menunjukkan pentingnya strategi manajemen beban puncak untuk mencapai tujuan keberlanjutan dan efisiensi dalam sistem distribusi listrik (Abdullah et al., 2020).

Strategi manajemen beban puncak, seperti penggunaan teknologi penyimpanan energi dan demand response, dapat membantu mengurangi dampak negatif dari beban puncak. Penerapan teknologi modern dalam manajemen beban dapat meningkatkan efisiensi sistem distribusi dan mengurangi kebutuhan akan investasi infrastruktur baru. Inovasi teknologi dapat berkontribusi pada pengelolaan beban puncak yang lebih baik dan lebih berkelanjutan (Ketelsen et al., 2020).

2.8 Efisiensi Transformator

Efisiensi transformator merupakan perbandingan antara daya keluaran (output) dan daya masukan (input) yang dirumuskan sebagai nilai efisiensi keseluruhan (η) yang di kemukakan oleh Huwae et al. (2025) dapat ditulis seperti pada persamaan:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.3)$$

Keterangan :

η = Efisiensi Transformator

P_{out} = Daya listrik keluaran (Output) atau daya pada kumparan sekunder

P_{in} = Daya listrik masukan (Input) atau daya pada kumparan primer

Karena efisiensi transformator sangat tinggi, pengukuran efisiensi tidak pernah dilakukan secara langsung dengan mengukur daya input dan output. Bahkan jika pengukuran dilakukan dengan wattmeter dengan akurasi 1%, efisiensi lebih besar dari 100% masih dapat dicapai, jika efisiensi transformator adalah 99% (Prayogi et al., 2023).

Transformator ideal merujuk pada perangkat yang mencapai efisiensi sebesar 100%, tapi pada kenyataannya efisiensi transformator kurang dari 100%. Hal ini dikarenakan rugi-rugi intrinsik dalam transformator, termasuk rugi inti besi atau core loss, serta rugi belitan tembaga atau copper loss. Kehilangan daya pada transformator tersebut secara umum disebabkan oleh kedua faktor utama ini, dan kondisi tersebut dikenal sebagai rugi daya atau power loss (Putri et al., 2020)

Tabel 2.2 memperlihatkan acuan efisiensi transformator dari standar perusahaan listrik negara (SPLN), yang digunakan secara luas dalam evaluasi transformator distribusi.

Tabel 2.2 Standar Efisiensi Transformator Distribusi SPLN

Kapasitas Trafo (kVA)	Efisiensi pada Beban
25	97,40%
50	98,10%
100	98,50%
160	98,80%
200	98,85%
250	99,0%
400	99,10%
630	99,20%
1000	99,30%

Sumber: PT PLN (Persero), Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) D3.002-1:2007 tentang Spesifikasi Transformator Distribusi 20 kV/400 V.

2.9 Penelitian Terdahulu

Adapun beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 2.3 Penelitian Terdahulu yang Relevan

No	Penulis & Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	Husein Arif & Eko Budi Wahyono (2022)	Pengaruh Beban Puncak Terhadap Efisiensi Trafo Daya	Efisiensi trafo mengalami penurunan dari 99,50% menjadi 99,35% ketika beban puncak meningkat, menunjukkan bahwa kenaikan arus beban berpengaruh terhadap rugi-rugi transformator.
2	Moch. Ridho Firmansyah et al. (2024)	Efisiensi Trafo 60 MVA GIS Simpang	Efisiensi turun dari 91,5% menjadi 90,7% saat beban puncak naik, menandakan peningkatan rugi tembaga dan penurunan kinerja trafo saat beban tinggi.
3	Nanang	Efisiensi Trafo 60	Efisiensi berada pada 99,635–99,687%

No	Penulis & Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
	Prayogi et al. (2023)	MVA GI Sanggrahan	pada beban 20–33 MW; efisiensi relatif stabil namun tetap menunjukkan kecenderungan turun saat beban mendekati batas atas.
4	Iqbal Fadillah et al. (2024)	Efisiensi Trafo Distribusi UP3 Garut	Efisiensi menurun seiring peningkatan beban, menunjukkan bahwa pembebanan berlebih secara langsung meningkatkan rugi-rugi daya pada transformator distribusi.
5	Jennifer M. Huwae et al. (2023)	Efisiensi Trafo 30 MVA Ambon Peaker	Efisiensi turun dari 99,6506% menjadi 99,6285% saat beban meningkat; meskipun penurunannya kecil, tren ini menggambarkan sensitivitas efisiensi terhadap beban puncak.
6	Amelia Monica Putri et al. (2023)	Efisiensi Trafo 66 MVA Sumbagut	Efisiensi meningkat sedikit dari 99,77% menjadi 99,80% karena beban masih berada dalam batas optimal sehingga rugi-rugi berada pada level minimum.
7	Arvian Widya Mukti (2021)	Efisiensi Trafo 31,5 & 60 MVA	Efisiensi berubah mengikuti kenaikan beban; peningkatan beban mendekati kapasitas menyebabkan rugi-rugi meningkat sehingga efisiensi perlu dioptimalkan melalui manajemen beban.
8	Alfi Ardian Rohman (2022)	Efisiensi & Umur Trafo 30 MVA GI Blora	Efisiensi turun dari 96,96% menjadi 95,80% akibat beban puncak; kenaikan temperatur dan rugi-rugi mempercepat penurunan umur transformator.
9	Rinaldy Prasetyo et al. (2021)	Efisiensi Operasional Trafo Distribusi 20 kV	Efisiensi turun signifikan ketika beban melebihi 80% rating; kondisi overload meningkatkan rugi-rugi tembaga secara drastis.
10	Agustiawan & Dwi Rahmad (2020)	Pola Beban Puncak di Pedesaan	Beban puncak pada jam 18.00–21.00 menyebabkan penurunan efisiensi sekitar 3%, terutama karena lonjakan konsumsi listrik pada rumah tangga.
11	Wahyu R. Majid et al. (2024)	Efisiensi Trafo 160 kVA ULP Mattoanging	Efisiensi berada pada 97,6–98,7% dan berubah mengikuti variasi pembebanan; beban tidak stabil menghasilkan fluktuasi efisiensi yang cukup signifikan.
12	Ruslan (2024)	Pembebanan	Ketidakseimbangan beban antar fasa

No	Penulis & Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
		Trafo 20 kV Makassar	menyebabkan penurunan efisiensi dan meningkatkan rugi-rugi pada fasa yang lebih tinggi bebannya.
13	Siti Nur Aini et al. (2023)	Beban Puncak dan Temperatur Minyak Trafo	Kenaikan beban puncak menyebabkan peningkatan temperatur minyak, dan hal ini menurunkan efisiensi akibat bertambahnya rugi-rugi internal.
14	Budi Hartono & R. Simbolon (2022)	Efisiensi Trafo 250 kVA Variasi Beban Harian	Efisiensi turun ketika beban mendekati 80–100%, menandakan bahwa transformator beroperasi kurang efisien ketika berada dekat kapasitas maksimumnya.
15	F. L. Tumewu et al. (2020)	Evaluasi Kinerja Trafo Distribusi Akibat Overload	Overload di atas 90% menyebabkan penurunan efisiensi secara drastis dan meningkatkan risiko kerusakan transformator.