

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Hasil Penelitian Terdahulu

Pada penelitian yang dilakukan oleh (Pamungkas, 2022) Penelitian mengenai pengaruh beban puncak terhadap efisiensi transformator 60 MVA 150/20 kV Unit 1 dan Unit 2 di Gardu Induk Kaliwungu ini dilakukan untuk mengidentifikasi sejauh mana variasi beban maksimum mempengaruhi kinerja efisiensi masing-masing unit. Berdasarkan hasil pengolahan data, Unit 1 menunjukkan rata-rata beban puncak siang dan malam hari melebihi 66%, yang beriringan dengan penurunan efisiensi hingga berada di bawah 95%. Sementara itu, Unit 2 hanya mengalami beban puncak rata-rata sekitar 17%, sehingga nilai efisiensinya konsisten berada di atas 96%.

Perbedaan tingkat pembebanan pada kedua transformator terbukti memberikan dampak langsung terhadap performa efisiensinya. Pada Unit 1, efisiensi tercatat sebesar 94,37% saat beban mencapai 34,4 MW pada siang hari, serta 93,84% ketika beban meningkat menjadi 38,8 MW pada malam hari. Adapun Unit 2 mencatat efisiensi 96,35% pada pembebanan 9,95 MW di siang hari, dan 96,32% pada beban 9,8 MW pada malam hari.

Penelitian yang di lakukan (Firmansyah, 2024) menilai efisiensi transformator daya melalui perhitungan menggunakan persamaan efisiensi transformator. Pada transformator 60 MVA 150/20 kV di GIS Simpang, beban puncak tertinggi tercatat sebesar 25,70 MW pada 8 Maret 2024 pukul 19.00, sedangkan beban puncak terendah sebesar 23,05 MW terjadi pada 28 Februari

2024 pukul 10.00. Rugi-rugi total maksimum mencapai 2,62 MW dan muncul pada periode beban puncak tertinggi, sementara rugi-rugi minimum sebesar 2,11 MW terjadi pada saat beban puncak terendah. Efisiensi transformator saat beban puncak tertinggi berada pada nilai 91,5%, sedangkan efisiensi terendah sebesar 90,7% terjadi bertepatan dengan meningkatnya rugi-rugi pada beban puncak 8 Maret 2024. Ketidaksempurnaan efisiensi transformator—yang tidak pernah mencapai 100%—disebabkan oleh adanya rugi-rugi *internal* dalam proses konversi energi.

Pada penelitian yang di lakukan oleh (Arif, 2022) mereka melakukan Penelitian yang dilakukan di PLN UPT Cawang ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh beban puncak terhadap efisiensi transformator daya. Pada Transformator 1, efisiensi tertinggi diperoleh sebesar 99,50% saat beban berada pada 18,8 MW, sedangkan efisiensi terendah sebesar 99,35% terjadi pada beban 35,9 MW. Untuk Transformator 2, efisiensi maksimum mencapai 99,49% pada beban 22,2 MW, dan efisiensi minimum sebesar 99,33% dicapai pada beban 37,9 MW. Secara umum, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan beban puncak berbanding terbalik dengan nilai efisiensi, yaitu semakin besar beban puncak yang diterima transformator, maka efisiensinya cenderung menurun.

Pada penelitian yang di lakukan oleh (Prayogi, 2022) memperlihatkan bahwa efisiensi pada Transformator Daya 1 sisi 150 kV mencapai 99,687% saat beban puncak tertinggi 32,8 MW, sedangkan pada beban puncak terendah 21,1 MW efisiensinya sebesar 99,679%. Untuk sisi 20 kV, efisiensi 99,635%

diperoleh pada beban puncak tertinggi 33,4 MW, dan 99,661% saat beban puncak terendah 20,17 MW. Transformator Daya 3 sisi 150 kV memiliki efisiensi 99,630% pada beban puncak tertinggi 33 MW, dan 99,679% pada beban terendah 18 MW. Pada sisi 20 kV, efisiensi 99,657% dicapai pada beban puncak tertinggi 33,74 MW, sedangkan pada beban terendah 16,81 MW efisiensinya 99,663%. Untuk Transformator Daya 4 sisi 150 kV, efisiensi sebesar 99,66% diperoleh pada beban puncak tertinggi 31 MW, dan menurun menjadi 99,45% pada beban terendah 8,4 MW. Sementara itu, pada sisi 20 kV, efisiensi 99,64% tercatat pada beban tertinggi 29,63 MW serta 99,48% pada saat beban terendah 8,27 MW.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Pamungkas (2022), Firmansyah. (2024), Arif (2022), serta Prayogi (2022) pada dasarnya telah mengkaji pengaruh beban puncak terhadap efisiensi dan rugi daya transformator, namun seluruhnya masih bergantung pada perhitungan manual dan belum menyediakan sistem terintegrasi untuk mengolah data secara otomatis. Selain itu, penelitian terdahulu belum menggabungkan analisis efisiensi, rugi daya, dan susut umur dalam satu pendekatan komprehensif, tidak mengacu secara eksplisit pada pedoman *termal* IEC 60076-7, serta belum ada yang mengkaji transformator 60 MVA di Gardu Induk Kalibakal. Kekurangan ini menunjukkan adanya celah penelitian berupa kebutuhan akan perangkat analitis yang lebih praktis, akurat, dan dapat digunakan langsung dalam kegiatan operasional.

Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan menambahkan perkiraan susut umur transformator dan mengembangkan sebuah aplikasi perhitungan yang mampu mengotomasi analisis efisiensi, rugi daya, dan susut umur transformator berdasarkan standar teknis yang relevan. Keunggulan metode ini terletak pada kemampuan aplikasi untuk memproses data secara cepat dan konsisten, sekaligus menyediakan alat bantu evaluasi yang lebih aplikatif bagi operator gardu induk dalam memantau kondisi transformator. Dengan demikian, penelitian ini menawarkan pendekatan yang lebih efektif dan inovatif dibandingkan penelitian sebelumnya.

B. Landasan Teori

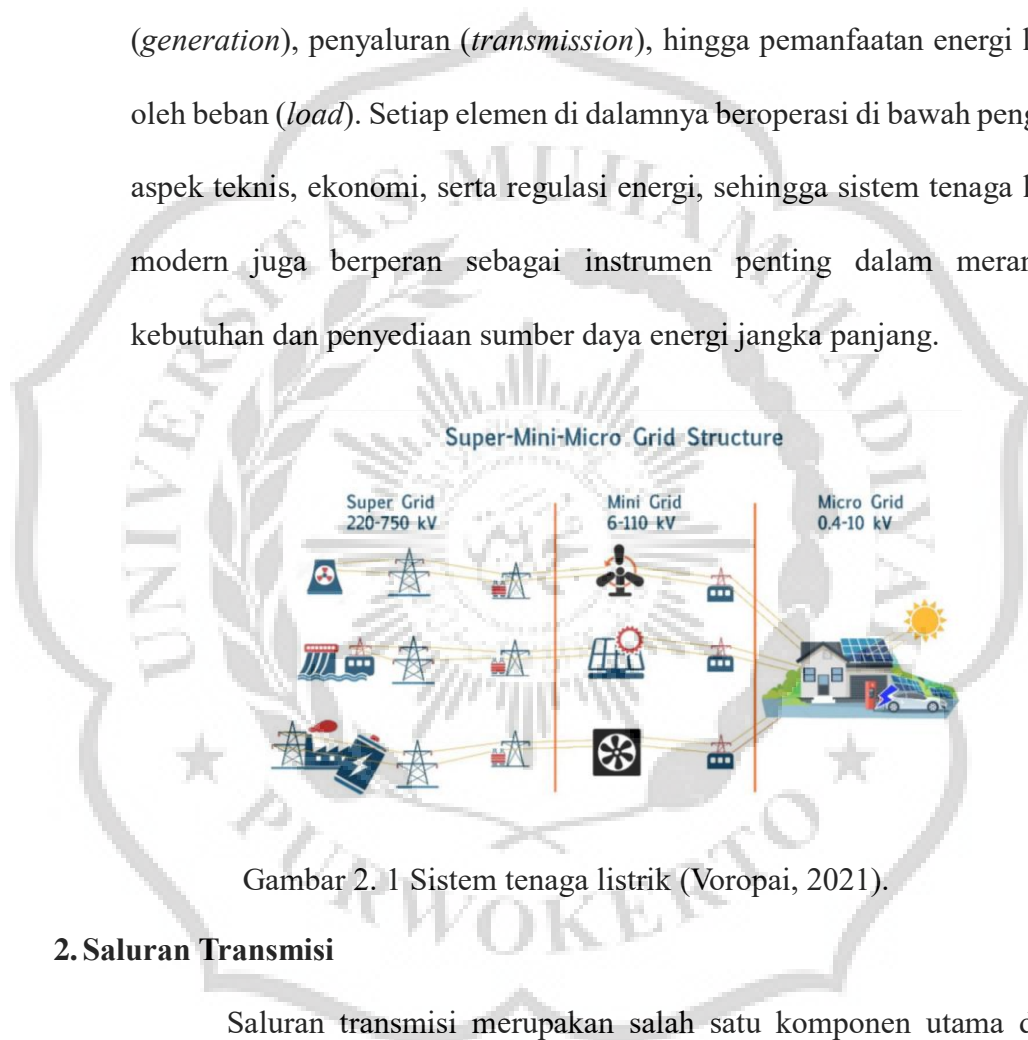
Pada bagian ini terdiri dari teori-teori pendukung untuk penelitian ini, yang bertujuan untuk memberikan arahan penulis mengerjakan penelitian ini.

1. Sistem Ketenaga Listrik

Pada Gambar 2.1 Sistem tenaga listrik merupakan jaringan terpadu yang dibangun untuk memproduksi, menyalurkan, dan menyalurkan kembali energi listrik dari pusat pembangkit hingga ke pengguna akhir dengan tingkat efisiensi, keandalan, dan kontinuitas yang tinggi yang bersifat kompleks, dimana energi primer diubah menjadi energi listrik dan kemudian dialirkan melalui jaringan transmisi serta distribusi dengan memperhatikan aspek keselamatan dan kestabilan operasi. Saat ini, perkembangan sistem tenaga listrik bergerak menuju penerapan *smart grid*, integrasi energi terbarukan, serta pengendalian berbasis digital guna

meningkatkan performa, efisiensi, dan keberlanjutan sistem secara keseluruhan (Voropai, 2021).

Menurut (Cole, 2024) Sistem tenaga listrik dapat dipandang sebagai suatu kerangka terpadu yang menghubungkan proses pembangkitan (*generation*), penyaluran (*transmission*), hingga pemanfaatan energi listrik oleh beban (*load*). Setiap elemen di dalamnya beroperasi di bawah pengaruh aspek teknis, ekonomi, serta regulasi energi, sehingga sistem tenaga listrik modern juga berperan sebagai instrumen penting dalam merancang kebutuhan dan penyediaan sumber daya energi jangka panjang.



Gambar 2. 1 Sistem tenaga listrik (Voropai, 2021).

2. Saluran Transmisi

Saluran transmisi merupakan salah satu komponen utama dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit menuju pusat-pusat beban melalui jaringan penghantar bertegangan tinggi. Menurut (Siregar, 2020) Saluran transmisi merupakan sarana yang digunakan untuk mengalirkan energi listrik dari pusat pembangkit menuju gardu induk distribusi dengan memanfaatkan tingkat

tegangan tinggi, sehingga kehilangan daya selama proses pengiriman dapat diminimalkan. Penerapan tegangan tinggi bertujuan menurunkan besar arus yang melewati konduktor, sehingga rugi-rugi daya akibat resistansi penghantar dapat ditekan.

Saluran transmisi pada Gambar 2.2 merupakan komponen kunci dalam sistem tenaga listrik yang memastikan kontinuitas dan keandalan proses penyaluran energi. Ketika terjadi gangguan pada saluran ini—misalnya hubung singkat ataupun kerusakan mekanis akibat kondisi cuaca ekstrem—stabilitas sistem dapat terganggu dan berpotensi menimbulkan pemadaman berskala besar. Dengan demikian, tingkat keandalan jaringan transmisi menjadi elemen yang sangat krusial dalam pengoperasian dan pengelolaan sistem tenaga listrik di tingkat nasional (Khoirunnisa, 2024).

Selain menjadi jalur penghubung antara pusat pembangkit dan pengguna akhir, saluran transmisi juga memiliki peran penting dalam mempertahankan mutu daya listrik yang dialirkan. Dalam penentuan biaya operasi sistem tenaga listrik, komponen transmisi memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi keseluruhan jaringan, di mana parameter seperti kualitas daya dan kestabilan tegangan menjadi tolok ukur utama kinerja sistem (Murniati, 2020).



Gambar 2. 2 Saluran Transmisi (Khoirunnisa, 2024).

3. Gardu Induk

Gardu induk merupakan suatu instalasi kelistrikan yang terdiri atas berbagai peralatan tenaga dan berfungsi sebagai titik peralihan tenaga listrik dari pembangkit menuju jaringan transmisi, yang selanjutnya diteruskan ke sistem distribusi primer. Fasilitas ini berperan sebagai pusat penyaluran daya dengan kapasitas kVA hingga MVA, sesuai dengan tingkat tegangan operasi yang digunakan (Prastowo, 2020).

Gardu induk merupakan komponen integral dari sistem transmisi yang tidak dapat dipisahkan dari proses penyaluran energi listrik. Aliran daya dari pusat pembangkit hingga sampai ke konsumen melalui tahapan teknis yang kompleks, dan salah satu tahapan penting tersebut membutuhkan keberadaan gardu induk. Secara prinsip, gardu induk adalah kumpulan peralatan listrik bertegangan tinggi yang tersusun dalam suatu konfigurasi terhubung, berfungsi sebagai titik temu antara tegangan dari sumber yang kemudian disalurkan ke *busbar*. Sebagian energi yang diterima dimanfaatkan untuk kebutuhan *internal* gardu, sementara sisanya dialirkan

ke konsumen maupun diteruskan menuju gardu induk lainnya dalam jaringan transmisi (Gönen, 2009).

4. Transformator

Transformator pada Gambar 2.3 merupakan peralatan listrik statis yang beroperasi berdasarkan prinsip induksi *elektromagnetik*, sehingga mampu mentransfer energi dari satu rangkaian listrik ke rangkaian lainnya tanpa mengubah frekuensi sistem (Adami, 2024). Kemudahan pengoperasian serta tingkat keandalannya yang tinggi menjadi salah satu alasan utama mengapa arus bolak-balik banyak digunakan dalam proses pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik. Secara umum, transformator tersusun atas kumparan primer dan sekunder yang dililitkan pada inti berbahan *ferromagnetik*. Dalam konteks pembahasan ini, transformator yang menjadi perhatian utama adalah transformator daya (Agustiawan, 2025).



Gambar 2. 3 Transformator

5. Prinsip Kerja Transformator

Transformator tersusun atas beberapa komponen utama, yaitu inti besi, belitan primer, dan belitan sekunder. Kinerja transformator didasarkan pada dua hukum fundamental dalam *elektromagnetika*, yaitu Hukum Induksi Faraday dan Hukum Lorentz. Hukum Faraday menyatakan bahwa gaya gerak listrik pada suatu rangkaian tertutup sebanding dengan laju perubahan *fluks magnetik* terhadap waktu, sehingga ketika arus mengalir melalui suatu belitan, akan timbul medan magnet di sekelilingnya. Sementara itu, Hukum Lorentz menjelaskan bahwa arus bolak-balik yang mengalir mengitari inti besi menyebabkan inti tersebut bersifat magnetik. Jika inti magnetik tersebut dikelilingi oleh lilitan, maka akan muncul perbedaan tegangan pada ujung-ujungnya akibat perubahan *fluks magnetic* (Firmansyah, 2024).

Prinsip operasi transformator melibatkan interaksi antara ketiga komponen utamanya: belitan primer, belitan sekunder, dan inti besi. Belitan-belitan tersebut dililitkan di sekitar inti dalam jumlah tertentu. Ketika belitan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik *sinusoidal* (V_p), arus *sinusoidal* (I_p) akan mengalir pada belitan tersebut. Arus ini menghasilkan *fluks magnetik* (Φ) yang memiliki fase yang sama dan berbentuk *sinusoidal* di sekitar belitan. Kehadiran inti besi yang menghubungkan kedua belitan menyebabkan *fluks magnetik* tersebut mengalir melalui inti dari sisi primer menuju sisi sekunder. Perubahan *fluks*

inilah yang kemudian menimbulkan tegangan induksi pada belitan sekunder transformator (Pamungkas, 2022).

6. Bagian-Bagian Transformator

Transformator terdiri dari beberapa bagian utama yang memiliki fungsi masing-masing agar trafo dapat bekerja dengan baik. Setiap bagian saling berhubungan untuk mengubah tegangan listrik sesuai kebutuhan.

a. Minyak Isolasi

Minyak transformator memiliki peran krusial dalam sistem isolasi sekaligus berfungsi sebagai media pendingin yang mengalirkan panas yang timbul akibat rugi-rugi daya pada transformator. Dengan demikian, minyak ini menjalankan dua fungsi utama, yaitu sebagai bahan pendingin dan sebagai *medium* isolasi. Untuk dapat bekerja secara optimal, minyak transformator harus memenuhi sejumlah persyaratan teknis berikut:

- 1) Kekuatan isolasi tinggi.
- 2) Penyalur panas yang baik, berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
- 3) Viskositas yang rendah, agar lebih mudah bersirkulasi dan memiliki kemampuan pendinginan menjadi lebih baik.
- 4) Titik nyala yang tinggi dan tidak mudah menguap yang dapat menimbulkan bahaya.
- 5) Tidak merusak bahan isolasi padat.

Perlu ditegaskan bahwa minyak transformator harus memiliki kualitas yang baik dan tetap terjaga kebersihannya. Peningkatan suhu minyak yang terjadi akibat panas yang dihasilkan oleh inti maupun kumparan dapat memicu perubahan sifat minyak tersebut. Selain itu, selama masa operasional yang panjang, berbagai jenis kontaminan dapat terbentuk dan mengurangi mutu minyak transformator. Kondisi ini pada akhirnya akan menurunkan efektivitas minyak dalam menjalankan fungsi utamanya, baik sebagai media pendingin maupun sebagai bahan isolasi (Marniat, 2021).

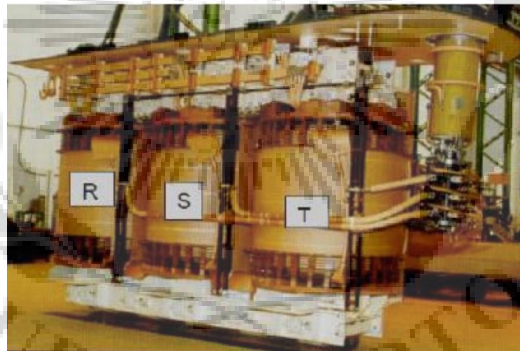
Keuntungan penggunaan minyak transformator sebagai isolator adalah sebagai berikut :

- 1) Isolasi cair cenderung dapat memperbaiki diri sendiri (*self healing*) jika terjadi pelepasan muatan (*discharge*).
- 2) Isolasi cair memiliki kerapatan 1000 kali atau lebih dibandingkan dengan isolasi gas, sehingga memiliki kekuatan dielektrik yang lebih tinggi.
- 3) Isolasi cair mengisi celah atau ruang yang akan diisolasi dan secara serentak melalui proses konversi menghilangkan panas yang timbul akibat rugi daya.

Berdasarkan SNI 04 H – 6954.2 – 2004 batas kenaikan suhu minyak yang diperbolehkan adalah 600 K pada suhu lingkungan normal (250 C sampai 400 C) (Pamungkas, 2022).

b. Kumparan

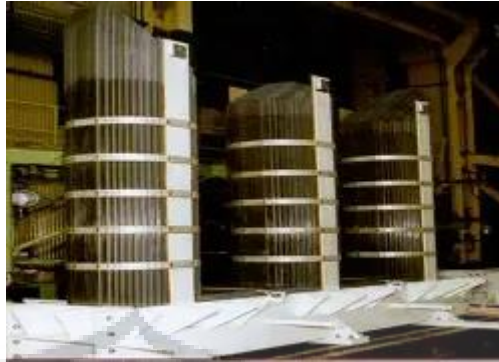
Kumparan transformator pada Gambar 2.4 merupakan rangkaian lilitan kawat berisolasi yang disusun membentuk sebuah kumparan. Di dalamnya terdapat dua bagian utama, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder, yang masing-masing diberi isolasi terhadap inti besi maupun terhadap lilitan lainnya menggunakan bahan isolasi padat seperti kertas isolasi, pertinak, dan material sejenis. Ketika salah satu kumparan diberi tegangan, lilitan tersebut akan menghasilkan *fluks* magnet pada inti, yang kemudian menginduksi kumparan lainnya sehingga muncul tegangan pada sisi kumparan yang berbeda (Pamungkas, 2022).



Gambar 2. 4 Kumparan (Mahendra, 2018).

c. Inti Besi

Inti besi pada Gambar 2.5 berfungsi membentuk lintasan *fluks* magnet yang timbul dari aliran arus pada kumparan transformator. Inti ini dibuat dari lapisan-lapisan baja tipis, yang dirancang untuk menekan timbulnya panas akibat arus eddy (Prayogi, 2022).



Gambar 2. 5 Inti Besi (Prayogi, 2022).

d. *Bushing*

Kumparan transformator terhubung ke jaringan luar melalui *bushing*, yaitu konduktor yang dibungkus material isolasi dan berperan memisahkan konduktor dari tangki transformator. Pada *bushing* juga terdapat titik khusus untuk melakukan pemeriksaan kondisi *bushing*, yang dikenal sebagai *center tap* (Afriansyah, 2019).

e. *Konservator*

Saat suhu kerja transformator meningkat, minyak isolasi akan memuai sehingga volumenya bertambah. Sebaliknya, ketika suhu menurun, minyak mengalami penyusutan dan volumenya berkurang. *Konservator* pada Gambar 2.6 berfungsi menampung perubahan volume minyak tersebut. Karena volume minyak di dalam *konservator* berubah-ubah, volume udara di ruang *konservator* juga ikut naik turun. Aliran udara yang keluar masuk *konservator* terhubung dengan udara luar. Untuk mencegah minyak isolasi terpapar kelembaban dan oksigen (pada tipe *konservator* tanpa *rubber bag*), udara yang masuk akan

dilewatkan melalui *silica gel* agar kandungan uap airnya berkurang (Prayogi, 2022).



Gambar 2. 6 *Konservator*.

f. *Tap changer*

Tap changer adalah alat perubah pembanding transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang sesuai dengan tegangan sekunder yang diinginkan dari tegangan primer yang berubah-ubah. 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.

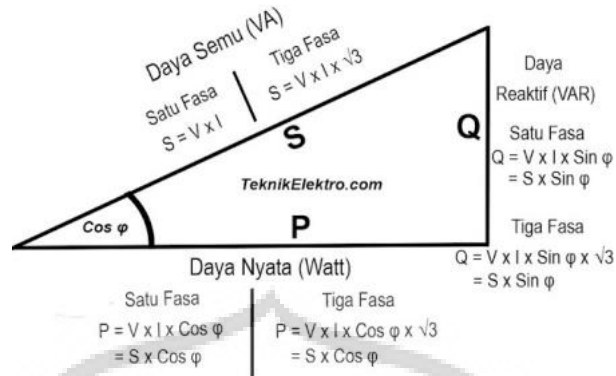
Tap changer terdiri dari :

- 1) *Selector Switch* yang merupakan rangkaian mekanis yang terdiri dari terminal untuk menentukan posisi tap atau ratio belitan primer.
- 2) *Diverter Switch* yang merupakan rangkaian mekanis yang dirancang untuk melakukan kontak atau melepaskan kontak dengan kecepatan yang tinggi.
- 3) Tahanan transisi yang merupakan tahanan sementara yang akan dilewati arus primer pada saat perubahan tap.

Dikarenakan aktivitas *tap changer* lebih dinamis dibanding dengan belitan utama dan inti besi, maka kompartemen antara belitan utama dengan *tap changer* dipisah (Pamungkas, 2022).

7. Jenis Daya Listrik

★ Pada sistem satu fasa, daya yang dikenal hanyalah daya nyata yang dinyatakan dalam watt. Berbeda dengan sistem tiga fasa yang memiliki tiga komponen daya, yaitu daya nyata, daya reaktif, dan daya semu. Ketiga besaran ini memiliki hubungan geometris seperti pada Gambar 2.7 digambarkan dalam bentuk segitiga siku-siku: daya semu berada pada sisi miring, sedangkan dua sisi tegaknya masing-masing mewakili daya nyata dan daya reaktif (Marniati, 2021).



Gambar 2. 7 Segitiga Daya (Pamungkas, 2022).

a. Daya nyata

Daya aktif (P) adalah daya aktual yang dibutuhkan oleh beban listrik. Satuan daya aktif adalah Watt (W)

$$\text{Line to netral / 1 Fasa } P = V \times I \times \cos \phi \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\text{Line to line / 3 Fasa } P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \dots\dots\dots (2.2)$$

Ketrangan :

P = Daya Nyata (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus Yang Mengalir Pada Penghantar (Amper)

$\cos \phi$ = Faktor Daya

Faktor daya selalu kurang dari atau sama dengan satu. Faktor daya yang rendah menyebabkan berbagai rugi-rugi daya karena arus beban yang tinggi.

b. Daya reaktif

Daya reaktif adalah komponen daya yang menimbulkan rugi-rugi energi serta membuat nilai faktor daya ($\cos \phi$) menurun. Besarnya daya reaktif dipengaruhi oleh jumlah peralatan listrik yang menghasilkan komponen daya tersebut. Adapun faktor daya sendiri merupakan rasio antara daya nyata (W) dan daya semu (VA) (Firmansyah, 2024).

$$\text{Line to netral / 1 Fasa } = V \times I \sin \phi \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\text{Line to line / 3 Fasa } Q = \sqrt{3} \times V \times I \sin \phi \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan :

Q = Daya Reaktif (VAr)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus Yang Mengalir Pada Penghantar (Amper)

c. Daya Semu

Daya semu adalah daya yang dihasilkan oleh perhitungan listrik sebelum beban listrik diterapkan. Daya semu atau daya total (S) atau dalam bahasa Inggris daya semu adalah hasil dari perkalian tegangan efektif (V) dan arus efektif (I).

$$\text{Line to netral / 1 Fasa } S = V \times I \dots\dots\dots(2.5)$$

$$\text{Line to line / 3 Fasa } S = \sqrt{3} \times V \times I \dots\dots\dots(2.6)$$

8. Sistem pendinginan transformator

Sistem pendinginan pada transformator berfungsi menjaga peralatan tetap bekerja pada suhu aman saat menanggung beban. Media yang digunakan untuk proses pendinginan seperti yang di tunjukan pada Tabel 2.1 dapat berupa udara atau gas, minyak, maupun air. Aliran media pendingin dapat berlangsung secara alami ataupun menggunakan bantuan alat. Pada pendinginan alami, transformator biasanya dilengkapi sirip atau radiator untuk mempercepat pelepasan panas. Jika diperlukan perpindahan panas yang lebih cepat, digunakan pompa untuk mengalirkan minyak, udara, atau air sehingga prosesnya menjadi pendinginan paksa (Gultom, 2021).

Tabel 2. 1 Sistem pendingin

No	Sistem Pendingin	Dalam Trafo		Diluar Trafo	
		Sirkulasi Alami	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alami	Sirkulasi Paksa
1	AN	-	-	Udara	-
2	AF	-	-	-	Udara
3	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7	OFWF	-	Minyak	-	Air
8	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10	ONAN/OFaf	Kombinasi 3 dan 6			
11	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

9. Karakteristik Transformator

Berdasarkan karakteristiknya transformator bisa dibedakan menjadi dua yaitu keadaan transformator tanpa beban dan keadaan transformator berbeban. Dimana dalam karakteristik ini harus dapat ditentukan salah satu

di dalam pemilihan karakteristik transformator tersebut apakah dalam keadaan tanpa beban atau dalam keadaan berbeban.

a. Keadaan Transformator Berbeban

Bila kumparan primer transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoid maka akan mengalir arus primer I_0 yang juga sinusoid dan dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni, I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 dan *fluks* (Φ) sefasa dengan I_0 .

Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya *fluks* bocor: Arus primer I_0 yang mengalir dalam kenyataannya bukan merupakan arus induktif murni, tapi terdiri atas komponen :

- Komponen arus rugi tembaga (I_c)
- Komponen arus pemagnetan (I_m)

Fluks yang sinusoid ini akan menghasilkan tegangan induksi E_1 (hukum faraday). Dalam hal ini tegangan induksi E_1 mempunyai kebesaran yang sama tetapi berlawanan arah dengan tegangan sumber V_1 (Sogen, 2018).

b. Keadaan Transformator Tanpa Beban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_1 , I_2 mengalir pada kumparan sekunder, di mana $I_2 = V_2 / Z_1$ dengan $\theta_2 = \phi$ faktor kerja beban. Arus beban ini akan menimbulkan gaya gerak magnet

(GGM) N2I2 yang cenderung menentang *fluks* (Φ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan I_m (Sogen, 2018).

10. Rugi-Rugi Daya

Kerugian daya pada transformator umumnya terbagi menjadi dua kelompok, yaitu kerugian akibat aliran arus beban dan kerugian yang muncul karena *fluks* pada inti besi. Karena arus beban tidak selalu tetap, maka rugi-rugi pada kumparan (akibat resistansi R) turut berubah mengikuti besar kecilnya arus. Sebaliknya, *fluks* pada inti besi cenderung stabil dalam kondisi operasi normal dan tidak dipengaruhi oleh variasi beban. Ada pula kerugian dielektrik pada bagian isolasi, namun besarnya relatif kecil sehingga sering dianggap tidak signifikan. Dengan berubahnya arus beban, kerugian tembaga pun bersifat tidak tetap dan mengikuti fluktuasi beban yang terjadi (Prayogi, 2022).

Untuk menghitung rugi-rugi pada transformator dapat menggunakan persamaan berikut :

a. Rugi-rugi Tembaga (P_{cu})

Rugi –rugi tembaga terjadi karena adanya arus listrik yang mengalir pada kawat tembaga, di tuliskan dengan persamaan (2.7)

$$P_{cu} = I^2 \cdot R \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan :

P_{cu} = Rugi-rugi tembaga (Watt)

I = Arus yang mengalir pada kawat tembaga

R = Tahanan kawat tembaga (Ohm)

Berubah-ubanya arus beban menyebabkan rugi-rugi tembaga yang berubah-ubah” nilainya. Nilai rugi-rugi tembaga untuk setiap perubahan beban dapat dituliskan dengan persamaan (2.8).

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1} \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan :

P_{t2} = Rugi-rugi saat pembebanan tertentu (KW)

S_2 = Rugi-rugi tembaga beban puncak (KW)

S_1 = Beban yang dioperasikan (kVA)

P_{t1} = Nilai pengenalan (kVA)

b. Rugi-rugi Besi (P_i)

Tidak seperti rugi-rugi tembaga, rugi-rugi inti besi selalu konstan dalam kondisi normal, terlepas dari nilai perubahan beban. Nilai rugi-rugi besi biasanya tertera pada papan nama masing-masing transformator daya.

11. Waktu Beban Puncak dan Luar Beban Puncak

PLN menggunakan dua istilah untuk membedakan pola konsumsi listrik pelanggan, yaitu Waktu Beban Puncak (WBP) dan Luar Waktu Beban Puncak (LWBP). WBP merujuk pada periode ketika sebagian besar pelanggan menggunakan listrik secara bersamaan di rumahnya. Rentang waktu yang umumnya masuk kategori WBP adalah sekitar pukul 17.00 hingga 22.00. Sementara itu, LWBP merupakan periode penggunaan listrik

di luar jam-pukul puncak tersebut. Dalam praktiknya, durasi WBP tidak selalu berlangsung tepat lima jam, namun dipastikan terjadi pada rentang waktu antara pukul 17.00 sampai 22.00.

Penggunaan listrik pada periode WBP yang sangat tinggi cenderung menyebabkan penurunan tegangan secara luas. Ketika peralatan listrik atau elektronik digunakan pada kondisi tegangan menurun, perangkat tersebut harus bekerja lebih keras dan membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai kinerja normal. Hal inilah yang membuat konsumsi listrik pada saat WBP menjadi lebih tinggi (Afriansyah, 2019).

12. Susut Umur Transformator

Penurunan kinerja bahan isolasi akibat paparan panas dikenal sebagai proses penuaan (*aging*), dan faktor inilah yang paling membatasi umur operasi transformator distribusi. Beban berlebih menyebabkan peningkatan suhu pada lilitan, yang pada akhirnya mempercepat penyusutan umur transformator. Suhu belitan dipengaruhi oleh besar kecilnya beban serta kondisi temperatur lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan analisis terhadap temperatur *hotspot* sesuai standar IEC 354, yang menetapkan batas maksimum sebesar 98°C. Jika suhu belitan melebihi nilai tersebut, umur transformator akan menurun lebih cepat. Untuk transformator yang memakai pendingin air, temperatur air tidak boleh melewati 25°C, sedangkan pada sistem pendingin udara, temperatur udara maksimum adalah 40°C dan tidak boleh turun di bawah -25°C untuk instalasi luar atau

-5°C untuk instalasi dalam. Selain itu, pada pendinginan udara, temperatur harian rata-rata tidak diperbolehkan melebihi 30°C (Mahendra, 2018).

13. Efisiensi Transformator

Transformator yang dianggap ideal adalah transformator dengan efisiensi 100%, yakni mampu mentransfer daya dari sisi tegangan tinggi ke tegangan menengah tanpa kehilangan energi. Namun, kondisi tersebut hampir tidak mungkin dicapai karena dalam praktiknya selalu terdapat rugi-rugi daya. Kerugian ini terutama berasal dari rugi inti besi (*core loss*) dan rugi tembaga pada belitan (*copper loss*). Kedua faktor tersebut menjadi penyebab utama hilangnya sebagian daya selama proses kerja transformator, yang secara keseluruhan dikenal sebagai rugi daya atau *power loss* (Pamungkas, 2022).

Karena efisiensi transformator umumnya sangat tinggi, pengukuran efisiensi tidak dilakukan dengan cara langsung membandingkan daya masuk dan daya keluar. Jika tetap dilakukan menggunakan wattmeter berakurasi 1%, hasil pengukuran bisa menunjukkan efisiensi di atas 100% meskipun nilai sebenarnya hanya sekitar 99%. Untuk menghindari hal tersebut, efisiensi transformator tidak diukur di lapangan, tetapi diuji di laboratorium atau pabrik dengan menentukan rugi-ruginya. Pada metode ini, daya *input* dihitung sebagai penjumlahan antara daya *output* dan total rugi-rugi transformator (Prayogi, 2022).

Adapun rugi-rugi transformator terdiri dari beban nol yang merupakan rugi besi (P_i) dan rugi tembaga (P_{cu}) pada P_{out} . Dengan demikian efisiensi transformator dapat ditulis seperti pada persamaan (2.9).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum \text{rugi-rugi}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.9)$$

Keterangan

η = Efisiensi

P_{out} = Daya keluaran (Watt)

\sum [rugi-rugi] = Total rugi

Pada Tabel 2.2 memperlihatkan acuan efisiensi transformator dari (PT PLN, 2013) dimana ketika daya nominal transformator 30 MVA standar efisiensinya sebesar 99,62 % sedangkan untuk daya nominal transformator 60 MVA standarnya yaitu 99,65 %

Tabel 2. 2 Standar Efisiensi Transformator

Nominal Daya (MVA)	Efisiensi (%)
30	99,62
60	99,65