

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Bagian ini menyajikan ringkasan singkat dari berbagai penelitian sebelumnya yang memiliki keterkaitan dengan topik penelitian ini. Peneliti menggunakan temuan-temuan dari studi terdahulu tersebut untuk mendukung tujuan dan maksud penelitian yang sedang dijalankan. Beberapa hasil penelitian terdahulu yang dijadikan acuan yakni:

1. Menurut hasil penelitian yang dilakukan oleh **Emil Sabilillah Al Choiri** dalam tugas akhirnya yang berfokus pada analisis pengaruh pembebanan terhadap efisiensi transformator di PLTU Cilacap, peneliti mengumpulkan data dari Unit 1 dan Unit 2 PT. Sumber Segara Primadaya. Untuk analisis ini, tim memanfaatkan data pembebanan transformator 20 kV/150 kV serta diagram satu garis sebagai fondasi studi. Selama 24 jam penuh pada tanggal 2 Oktober 2017, Unit 1 dipantau setiap jam untuk menentukan efisiensinya. Dari pengamatan, beban 215,154 MW menghasilkan efisiensi terendah, yaitu 92,17%. Di sisi lain, Unit 2 menunjukkan titik efisiensi minimum 94,62% pada beban 217,041 MW. Sementara itu, hasil pengukuran yang berulang 24 kali memperlihatkan puncak efisiensi pada Unit 1 sebesar 99,88% ketika beban mencapai 293,514 MW, dan Unit 2 mencapai 99,75% pada beban 177,973 MW. Meski secara teori efisiensi transformator bisa mencapai 100%, kenyataannya energi yang hilang akibat rugi-rugi pada inti besi termasuk rugi histerisis dan rugi arus eddy yang berubah menjadi panas membatasi pencapaian efisiensi ideal. Rata-rata dari seluruh pengukuran 24 jam menunjukkan efisiensi Unit 1 sebesar 98,18% dan Unit 2 sebesar 98,71%. Kesimpulannya, transformator mampu mempertahankan efisiensi rata-rata di atas 98%, meski kerugian pada inti besi terbukti menurunkan daya keluaran belitan sekunder saat efisiensi menurun. Dengan kata lain, semakin besar rugi-rugi inti besi, semakin kecil energi yang berhasil disalurkan. [8]
2. Menurut penelitian yang dilakukan oleh **Wahyu Hidayat** dalam tugas akhirnya, ia meneliti pengaruh pembebanan terhadap efisiensi transformator di PLTA

Wonogiri. Pengambilan data dilakukan secara langsung di lokasi PLTA Wonogiri dengan mencatat beberapa parameter penting seperti tegangan, arus, beban, rugi inti, dan rugi tembaga. Setelah proses pengumpulan data selama 24 jam, seluruh data tersebut kemudian diolah untuk menghitung tingkat efisiensi transformator. Hasil perhitungan tersebut selanjutnya dianalisis untuk mengetahui faktor yang memengaruhi efisiensi. Berdasarkan hasil penelitian, diketahui bahwa perubahan beban, baik pada kondisi beban tertinggi maupun terendah, memiliki pengaruh terhadap nilai efisiensi transformator, meskipun pengaruhnya tidak terlalu besar. Faktor utama yang memengaruhi efisiensi adalah rugi-rugi pada transformator, khususnya rugi tembaga yang terjadi akibat variasi beban. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa rata-rata efisiensi transformator selama 24 jam mencapai 99%. [9]

3. Menurut **Mustari, Roy Kurviawan, dan Ramlan** dalam Jurnal penelitian sains analisis efisiensi transformator dalam pembangkit listrik di PT.PLN Indonesia Power UPDK Keramasan, focus penelitian untuk mengetahui efisiensi transformator di pembangkit listrik UPDK Keramasan. Menentukan seberapa besar efisiensi trafo dalam kondisi operasional mingguan berdasarkan beban yang ada. Menggunakan metode kuantitatif, data efisien dihitung mingguan (4 minggu), pengukuran berdasarkan daya masuk / daya keluar transformator di tiap minggu, kemudian dihitung persentase efisiensinya. Hasil yang di dapatkan pada minggu ke-1 sampai Minggu ke-4 secara berturut-turut yaitu 99,81 %; 100%; 99,96%; 99,96%. Berdasarkan hasil tersebut trafo di pembangkit dinyatakan sangat efisien, nilai efisiensi yang tinggi menandakan bahwa rugi-rugi daya pada transformator relative kecil dalam periode pengamatan dan bahwa Sebagian besar daya input dapat dimanfaatkan dalam hal ini menaikkan penjualan Listrik. [10]
4. Menurut penelitian yang dilakukan oleh **Rocki Mahendra, Ayong Hiendro, dan Yandri** dalam karya berjudul Analisis Pengaruh Pembebanan terhadap Efisiensi dan Umur Transformator pada PLTU Bengkayang 2×50 MW PT PLN (Persero) UPK Singkawang, yang menggunakan metode kuantitatif, pengumpulan data dilakukan melalui pengukuran pada dua unit transformator selama periode 1–7 Januari 2022. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pada unit 1, rata-rata

efisiensi berturut-turut selama tanggal tersebut adalah 99,5766%; 99,5360%; 99,7991%; 99,8600%; 99,8040%; 99,7718%; dan 99,4924%. Sedangkan pada unit 2, nilai efisiensi rata-rata harian selama periode yang sama tercatat sebesar 99,6889%; 99,7538%; 99,5924%; 99,7226%; 99,6617%; 99,6454%; dan 99,5177%. Secara keseluruhan, penelitian tersebut menyimpulkan bahwa efisiensi transformator cenderung meningkat ketika beban yang diterima lebih besar, dan menurun saat beban berkurang. Adapun estimasi sisa umur operasi transformator menunjukkan bahwa unit 1 memiliki sisa umur 17,9857 tahun, sedangkan unit 2 memiliki sisa umur 17,9587 tahun. Perbedaan ini disebabkan oleh beban pada unit 2 yang lebih tinggi, yaitu sekitar 6,2421 MW, sehingga mempercepat penurunan efisiensinya dibandingkan unit 1. [11]

5. Menurut **Gera Nugraha & Irwanto** dalam Jurnal Elektonika dan Teknik Informatika terapan volume 3, nomor 2, Juni 2025 dengan judul analisis efisiensi trafo 20 kV/150 kV GT pada PT Indonesia Power PLTU Banten 2 Labuan Unit 1 dan 2 dalam pengaruh beban. Tujuan penelitian untuk bagaimana variasi beban (loading) pada trafo GT 20 kV/150 kV mempengaruhi efisiensi operasionalnya di PLTU Banten 2 Labuan Unit 1 dan 2, metodologi yang digunakan yaitu studi kuantitatif, pengumpulan data beban dan efisiensi pada kedua unit trafo (Unit 1 & Unit 2) dalam kondisi beban variatif. Kemudian menganalisis hubungan antara persentase beban trafo dengan efisiensi yang diperoleh. Hasil yang didapatkan adalah efisiensi trafo sangat bergantung pada besarnya beban; semakin besar beban mendekati kapasitas ideal, efisiensi meningkat. Namun pada saat beban rendah, efisiensi menurun karena rugi-rugi tetap (seperti core losses) menjadi proporsi yang lebih besar dari total daya yang disuplai, pengaruh beban terhadap efisiensi terlihat di kedua unit, menunjukkan bahwa operasi beban optimal penting agar trafo beroperasi secara efisien. Trafo GT 20 kV/150 kV di PLTU Banten 2 Labuan menunjukkan efisiensi yang cukup tinggi ketika beban operasi mendekati beban optimal. Untuk mencapai efisiensi maksimal dan mengurangi rugi-rugi, pengaturan beban yang sesuai (menjaga agar beban tidak terlalu rendah) sangat penting. [12]

6. Menurut **Jennifer Michelle Huwae; Marceau A. F. Haurissa; Hamles L. Latupeirissa** dalam Jurnal FORTECH dengan judul “Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Transformator Daya 30 MVA PLTMG Ambon Peaker 30 MW”, Tujuan penelitian ini untuk mengukur efisiensi transformator daya di PLTMG Ambon Peaker 30 MW, khususnya Blok #1, menganalisis bagaimana variasi beban (pembebanan) mempengaruhi efisiensi karena rugi-rugi daya (rugi inti + rugi tembaga) yang muncul. Metodologi penelitian yang digunakan Adalah pendekatan kuantitatif, menghitung rugi-rugi daya dan efisiensi berdasarkan spesifikasi teknis trafo + data historis beban puncak + data arus/tegangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi trafo saat beban tertinggi 16,61 MW sekitar 99,6258%, sedangkan efisiensi tertinggi tercatat pada bulan Mei, saat beban kira-kira 13,05 MW, yaitu sekitar 99,6506%. Semakin besar beban (terutama mendekati kapasitas/tertinggi) efisiensi sedikit menurun karena rugi tembaga bertambah signifikan sedangkan saat beban sedikit lebih rendah, efisiensi bisa sedikit lebih baik karena rugi tembaga relatif kecil. [13]
7. Menurut **Hery Setijasa dan Triyono** dalam ORBITH VOL. 19 NO.3 November 2023 : 315-323 dengan Judul “Perhitungan Efisiensi Transformator”, pembahasan pokok masalah dilakukan guna mengetahui efisiensi transformator dan unsur-unsur yang mempengaruhinya. Transformator daya merupakan perangkat listrik yang penting karena berkaitan langsung dengan transmisi dan distribusi tenaga listrik. Dalam praktek selalu muncul masalah yaitu terdapat rugi-rugi pada transformator berupa rugi tembaga dan rugi inti sehingga nilai efisiensi transformator di bawah 100 %. Kedua unsur rugi-rugi itu berpengaruh dominan terhadap efisiensi transformator. Rugi inti diakibatkan oleh histerisis dan arus eddy yang bergantung pada frekuensi sinyal sumber tegangan dan jenis bahan inti. Rugi tembaga itu dihasilkan dan bergantung pada arus beban dan resistansi belitan. Distorsi harmonisa yang muncul ketika transformator melayani beban juga merupakan unsur rugi daya pada transformator yang dapat menurunkan kinerja serta kapasitas kerja transformator. Dampak pengaruh semua unsur tersebut dapat dilihat dari nilai persentase (%) efisiensi transformator [14].

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Transformator

Tegangan listrik dapat diubah melalui transformator, yang mampu meningkatkan dari level rendah ke tinggi atau menurunkannya kembali sesuai kebutuhan penggunaannya. Perangkat ini juga berfungsi untuk meningkatkan daya listrik yang akan disalurkan, dengan cakupan penggunaan yang sangat luas, mulai dari sistem tenaga listrik hingga bidang elektronika. Penyesuaian tegangan secara tepat dan efisien dalam sistem tenaga listrik dilakukan oleh transformator, misalnya untuk menyediakan tegangan tinggi yang diperlukan pada transmisi daya jarak jauh. Karena sifatnya yang andal dan mudah dioperasikan, transformator dianggap sebagai komponen utama dalam sistem kelistrikan, sekaligus menjadi alasan utama mengapa arus bolak-balik (AC) lebih sering digunakan dalam proses pembangkitan dan distribusi energi listrik [15].



Gambar 2.1 Transformator GT PLTU Sofifi

Sumber : (Dokumentasi PLTU Sofifi)

2.2.2 Jenis -Jenis Transformator pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), transformator memiliki peranan yang sangat penting dalam proses penyaluran energi listrik dari generator menuju sistem transmisi dan distribusi. Transformator yang digunakan

pada PLTU dirancang khusus untuk bekerja pada daya besar, tegangan tinggi, serta kondisi operasi yang kontinu. Berdasarkan fungsi dan letak pemasangannya, transformator pada PLTU dapat diklasifikasikan sebagai berikut.

➤ Transformator Generator (Generator Transformer/GT)

Transformator daya GT (Generator Transformer) merupakan transformator yang digunakan pada pembangkit tenaga listrik untuk menaikkan tegangan keluaran generator dari tegangan menengah menjadi tegangan tinggi atau ekstra tinggi sebelum disalurkan ke sistem transmisi. Peningkatan tegangan ini bertujuan untuk mengurangi arus listrik yang mengalir sehingga rugi-rugi daya pada saluran transmisi dapat diminimalkan dan efisiensi penyaluran energi listrik dapat ditingkatkan. Transformator GT dipasang secara langsung antara generator dan jaringan transmisi, sehingga berperan sebagai penghubung utama antara pembangkit dan sistem tenaga listrik. Selain berfungsi sebagai penaik tegangan, transformator daya GT juga berperan sebagai isolasi listrik antara generator dan sistem transmisi guna meningkatkan keandalan dan keselamatan operasi. Transformator ini umumnya memiliki kapasitas daya yang besar serta dilengkapi dengan sistem pendinginan dan sistem proteksi yang memadai untuk menjaga kinerja dan keamanan peralatan. Sisi tegangan rendah transformator terhubung ke generator, sedangkan sisi tegangan tinggi terhubung ke switchyard dan jaringan transmisi, sehingga energi listrik yang dihasilkan pembangkit dapat disalurkan secara aman, stabil, dan berkesinambungan.



Gambar 2.2 Trafo GT
Sumber : (Dokumentasi PLTU Sofifi)

➤ Transformator Unit (Unit Auxiliary Transformer / UAT)

Transformator unit berfungsi untuk menyuplai daya listrik ke peralatan bantu PLTU, seperti pompa boiler, fan, conveyor batubara, sistem pendingin, dan peralatan kontrol. Transformator ini mengambil daya langsung dari sisi generator sebelum tegangan dinaikkan oleh transformator generator. Transformator unit beroperasi pada kondisi beban yang bervariasi tergantung pada kebutuhan operasional unit pembangkit. Oleh karena itu, transformator ini dirancang agar memiliki performa yang baik pada berbagai tingkat pembebanan. Efisiensi transformator unit juga mempengaruhi konsumsi daya internal pembangkit (auxiliary power), yang secara tidak langsung berdampak pada efisiensi bersih (net efficiency) PLTU.



Gambar 2.3 Trafo UAT
Sumber : (Dokumentasi PLTU Sofifi)

➤ **Transformator Start-Up (Start-Up Transformator/ SST)**

Transformator start-up digunakan untuk menyuplai daya awal ke peralatan bantu PLTU saat unit pembangkit belum beroperasi. Transformator ini memperoleh sumber daya dari jaringan eksternal atau sistem interkoneksi, kemudian menyalurkan daya ke peralatan bantu hingga generator siap beroperasi. Pada kondisi start-up, transformator ini bekerja dengan karakteristik beban yang berubah-ubah dan cenderung fluktuatif. Oleh karena itu, rugi-rugi transformator start-up perlu diperhatikan agar tidak terjadi pemborosan energi selama proses start unit. Meskipun bukan transformator utama, kinerja dan efisiensi transformator start-up turut berperan dalam keandalan operasi PLTU.



Gambar 2.4 Trafo SST

Sumber : (<https://www.daelimtransformer.com/station-service-transformers.html>)

➤ Transformator Daya Tiga Fasa

Transformator yang digunakan pada PLTU umumnya merupakan transformator tiga fasa, karena sistem pembangkitan dan transmisi tenaga listrik menggunakan sistem tiga fasa. Transformator tiga fasa memiliki keunggulan berupa efisiensi yang lebih tinggi, ukuran yang lebih ringkas, serta penggunaan material yang lebih ekonomis dibandingkan dengan penggunaan tiga transformator satu fasa terpisah. Dalam transformator generator tiga fasa, konfigurasi hubungan belitan seperti $Y-\Delta$ atau $\Delta-Y$ digunakan untuk menyesuaikan kebutuhan sistem, mengurangi harmonisa, serta meningkatkan stabilitas tegangan. Pemilihan konfigurasi belitan ini juga berpengaruh terhadap rugi-rugi dan performa transformator secara keseluruhan.



Gambar 2.5 Trafo daya 3 fasa

Sumber : (https://pineele.com/hu_hu/id/2500-kva-distribution-transformer)

➤ Transformator Berpendingin Minyak (*Oil Immersed Transformer*)

Transformator generator pada PLTU umumnya menggunakan sistem pendinginan minyak, karena mampu menangani daya besar dan temperatur operasi tinggi. Minyak transformator berfungsi sebagai media pendingin sekaligus isolasi listrik. Sistem pendinginan yang umum digunakan antara lain ONAN (*Oil Natural Air Natural*) dan ONAF (*Oil Natural Air Forced*). Efektivitas sistem pendinginan sangat berpengaruh terhadap rugi-rugi transformator, khususnya rugi tembaga yang menyebabkan kenaikan temperatur. Kenaikan temperatur yang berlebihan dapat meningkatkan resistansi kumparan dan menurunkan efisiensi transformator.

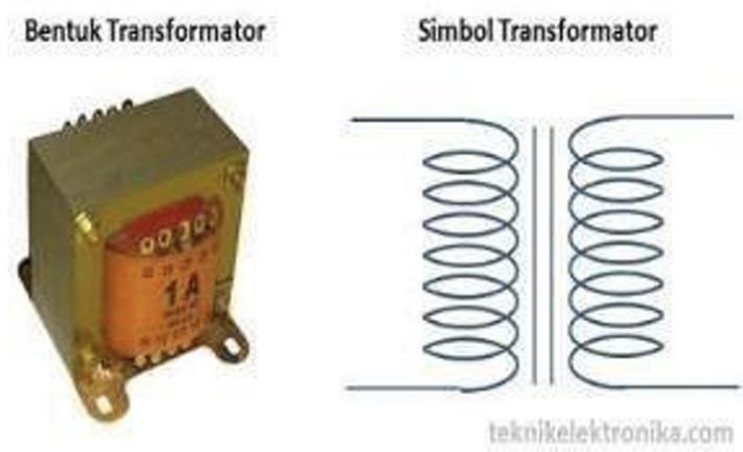


Gambar 2.6 Trafo Berpendingin Minyak

Sumber : (<https://www.winley-electric.com/indonesian/sale-43213953-oil-cooling-transformer-10000kva-11kv-to-33kv-step-up-transformer.html>)

2.2.3 Prinsip Kerja Transformator

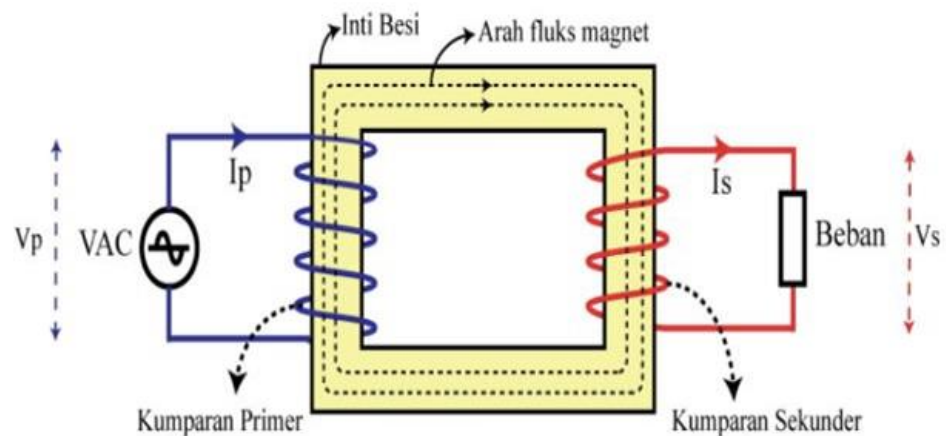
Trafo sederhana pada dasarnya terdiri dari 2 lilitan atau lilitan berinsulasi, yaitu primer dan sekunder. Kebanyakan transformator memiliki lilitan kumparan terisolasi di sekitar sepotong besi yang disebut inti. Gambar 2.7. menunjukkan bentuk dan simbol transformator:



Gambar 2.7 Bentuk dan Simbol Transformator

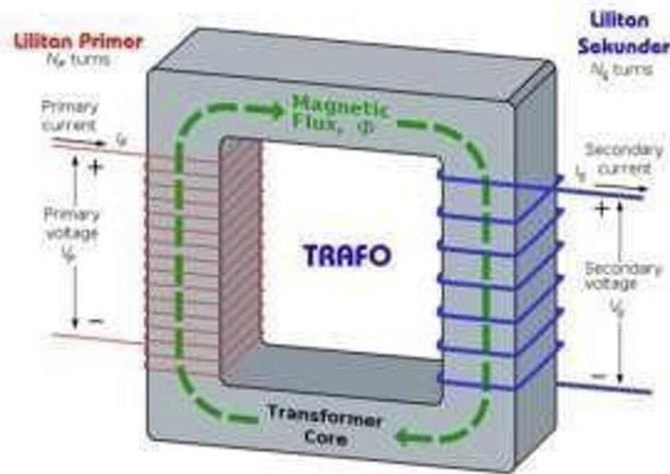
Sumber : (teknikelektronika.com)

Transformator bekerja berdasarkan prinsip Hukum Ampere dan Hukum Faraday. Hukum ini menyatakan bahwa arus listrik dapat menciptakan medan magnet, dan perubahan medan magnet itu mampu menghasilkan arus listrik induksi. Ketika arus bolak-balik (AC) mengalir melalui kumparan primer, fluks magnet yang terbentuk terus berubah secara berkala. Perubahan ini menimbulkan gaya gerak listrik (GGL) induksi di kumparan primer. Inti besi kemudian menyalurkan fluks magnet tersebut ke kumparan sekunder. Karena fluks yang diterima kumparan sekunder juga berubah, kumparan ini menghasilkan GGL induksi sehingga tercipta beda potensial (tegangan) di ujung-ujungnya. Secara umum, transformator terdiri dari dua kumparan, primer dan sekunder, yang biasanya dililitkan pada inti besi untuk memudahkan aliran fluks magnet, sebagaimana terlihat pada Gambar 2.8:



Gambar 2.8 Prinsip Kerja Transformator

Sumber : Rocki Mahendra, Ayong Hiendro, Yandri. (2023)



Gambar 2.9 Fluksi pada Transformator

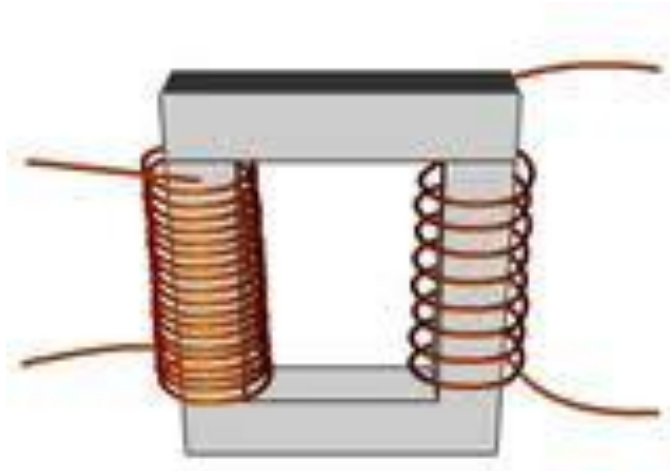
Sumber : Hery Setijasa dan Triyono.(2023)

Ketika sumber tegangan AC menyuplai arus ke kumparan primer, inti transformator mulai menampung fluks magnet bolak-balik. Fluks ini membentuk lingkaran tertutup yang memicu aliran arus dalam kumparan primer. Fenomena ini menimbulkan induksi diri pada kumparan primer, sementara interaksi antara kumparan primer dan sekunder menimbulkan induksi bersama yang menyalurkan fluks magnet ke kumparan sekunder [10]. Transformator dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis berdasarkan jumlah lilitannya, yaitu transformator satu lilitan, dua lilitan, dan tiga lilitan. Transformator satu lilitan, yang dikenal juga sebagai autotransformator, memiliki lilitan primer yang sebagian berfungsi sekaligus sebagai lilitan sekunder. Pada transformator dua lilitan, dua sisi tegangan tinggi dan tegangan rendah dimiliki, dan kumparan primer serta sekunder dipisahkan secara fisik. Sebaliknya, pada transformator tiga lilitan, kumparan primer, sekunder, dan tersier digunakan, dioperasikan pada level tegangan yang berbeda, serta biasanya dialokasikan untuk sistem tenaga listrik berskala besar agar distribusi dan interkoneksi antar jaringan dapat terlaksana.

Perangkat transformator terdiri atas beberapa komponen utama yang memiliki fungsi berbeda-beda, yakni :

- a. Kumparan, beberapa lilitan kawat berisolasi menggulung membentuk kumparan. Produsen melapisi setiap kumparan dengan bahan isolasi

padat, seperti karton atau pertinax, agar kumparan tetap terpisah dari inti besi maupun kumparan lain, sehingga risiko hubungan singkat dapat dihindari.

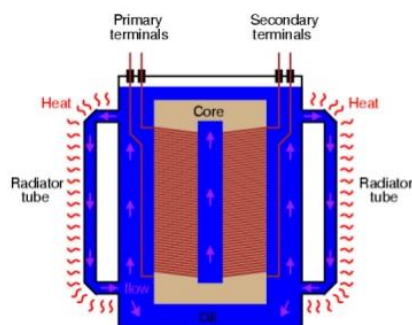


Gambar 2.10 Kumparan pada transformator

Sumber : ([Transformator / Trafo - IPA Edukasi](#))

- b. Minyak Transformator, dalam transformator daya berkapasitas besar, kumparan dan inti besi biasanya direndam ke dalam minyak transformator. Panas yang dihasilkan diserap dan dihantarkan oleh minyak ini, sekaligus digunakan sebagai isolator listrik karena kemampuannya menahan tegangan tinggi.

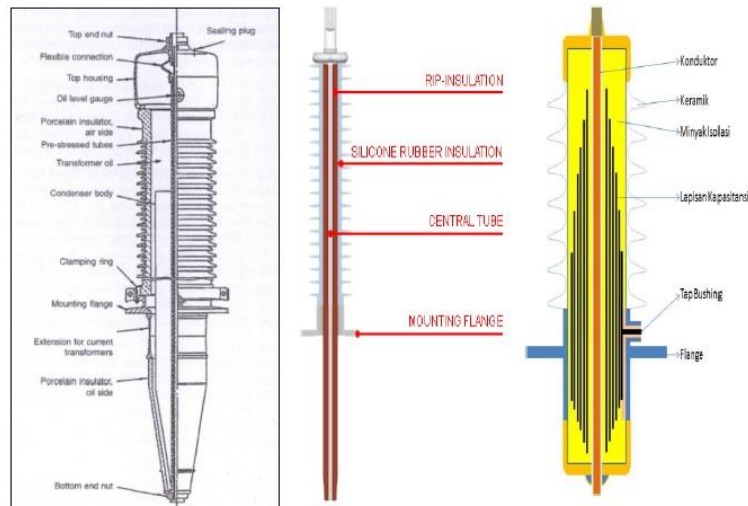
MINYAK TRANSFORMATOR



Gambar 2.11 Minyak Transformator

Sumber : ([Apa Itu Minyak Transformator ? Fungsi dan Penggunaan Minyak Transformator - Studi Elektronika](#))

- c. Bushing Transformator, kumparan transformator dan jaringan listrik eksternal dihubungkan melalui bushing. Konduktor yang diselubungi bahan isolator digunakan pada bushing, sehingga arus tidak bocor karena tangki transformator terpisah dari konduktor.



Bagian – bagian dari bushing

Gambar 2.12 Bushing Transformator

Sumber : ([Bushing Trafo - ELECTRICITY](#))

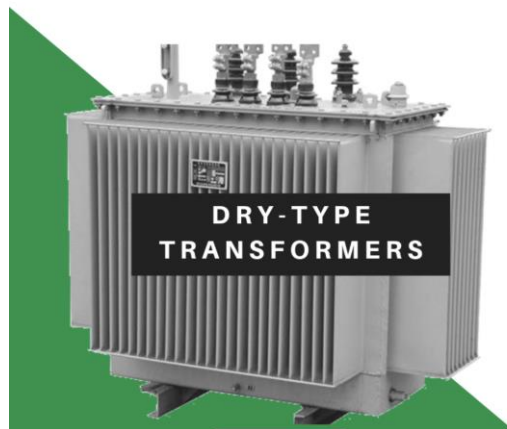
- d. Tangki dan Konservator, Tangki berfungsi sebagai wadah yang menampung minyak transformator beserta seluruh bagian internal seperti kumparan dan inti besi. Pada transformator minyak, tangki biasanya dilengkapi dengan konservator yang berfungsi menampung perubahan volume minyak akibat perubahan suhu selama operasi.



Gambar 2.13 Tangki dan Konservator

Sumber : ([Bagian Transformator Lengkap dengan Prinsip Kerjanya - BengkelTV.id](#))

- e. Pendingin Transformator, Berdasarkan sistem pendinginannya, transformator dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *Dry Type Transformer* dan *Oil-Immersed Transformer*. Transformator tipe kering menggunakan udara sekitar sebagai media pendingin alami, sehingga lebih mudah dioperasikan dan membutuhkan biaya perawatan yang relatif rendah. Sedangkan transformator berisi minyak menggunakan sirkulasi minyak sebagai media pendingin sekaligus isolasi tambahan [10]



Gambar 2.14 Dry Tipe Transformator

Sumber : ([Dry Type Transformers: Strengths and Limitations](#))

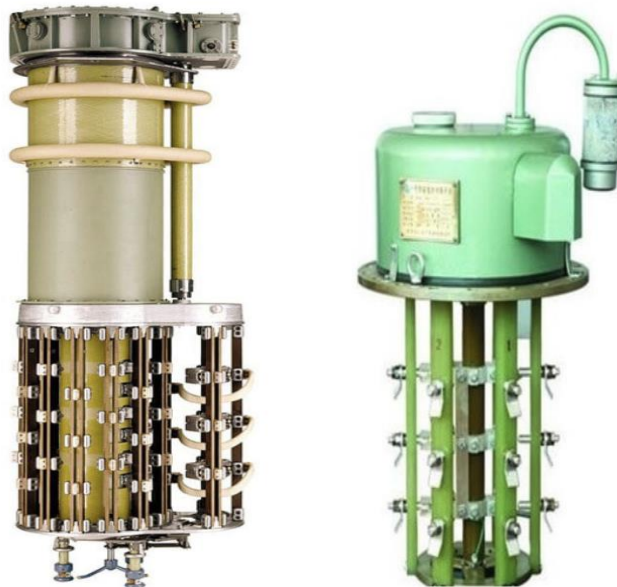


Gambar 2.15 Oil-Immersed Transformer

Sumber : ([Lemi Trafo :: Oil-Immersed Transformers](#))

- f. *Tap Changer*, merupakan salah satu komponen pada transformator daya yang berfungsi untuk mengubah rasio lilitan transformator dengan cara memindahkan posisi tap pada kumparan, sehingga tegangan keluaran dapat disesuaikan tanpa mengubah tegangan sumber. Perubahan rasio lilitan ini dilakukan untuk menjaga agar tegangan sekunder transformator tetap berada dalam batas toleransi yang diizinkan meskipun terjadi fluktuasi beban atau tegangan sistem.

Berdasarkan cara pengoperasiannya, *tap changer* dibedakan menjadi *Off Load Tap Changer (OLTC)* yang hanya dapat dioperasikan saat transformator tidak berbeban, dan *On Load Tap Changer (OLTC)* yang dapat dioperasikan saat transformator dalam kondisi berbeban. Penggunaan *tap changer* bertujuan untuk meningkatkan kualitas tegangan, menjaga stabilitas sistem tenaga listrik, serta mengoptimalkan kinerja dan efisiensi transformator selama beroperasi.



Gambar 2.16 Tap Changer

Sumber : ([15 Bagian Penting Transformator dan Fungsinya - Wira Electrical Engineering Portal](#))

2.2.3 Rugi – Rugi Transformator

Transformator tidak memiliki komponen yang bergerak atau berputar di dalamnya, sehingga tidak terjadi rugi akibat gesekan mekanis seperti pada mesin listrik lainnya. Oleh karena itu, sebagian besar transformator mampu beroperasi dengan tingkat efisiensi yang cukup tinggi, umumnya mencapai sekitar 90% atau lebih [16]. Meskipun transformator memiliki fungsi penting, perangkat ini tetap mengalami berbagai bentuk kehilangan daya. Kehilangan tersebut umumnya dibagi menjadi dua kategori utama: rugi tembaga dan rugi besi. Rugi tembaga muncul karena adanya resistansi pada kumparan transformator, dan besarnya meningkat seiring dengan bertambahnya arus beban; dengan kata lain, arus yang lebih tinggi menimbulkan rugi tembaga yang lebih besar. Di sisi lain, rugi besi terjadi dalam dua bentuk, yakni rugi histerisis, yang timbul akibat perubahan arah magnetisasi pada inti besi, serta rugi arus Eddy yang dihasilkan dari arus pusar yang terbentuk di dalam inti besi [17]

Kerugian daya pada transformator muncul dari dua sisi, yakni sisi primer dan sisi sekunder. Beberapa faktor utama penyebab timbulnya rugi-rugi tersebut meliputi rugi besi (yang terdiri atas rugi histerisis dan rugi arus Eddy), rugi akibat fluks bocor, serta rugi tembaga [18]. Besarnya rugi histerisis sangat dipengaruhi oleh jenis bahan besi yang digunakan sebagai inti transformator. Oleh karena itu, dalam penerapannya, pemilihan material inti perlu diperhatikan dengan cermat agar kerugian histerisis dapat diminimalkan. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, transformator hanya beroperasi dengan sumber tegangan bolak-balik (AC), sehingga arus yang mengalir untuk membangkitkan fluks magnet pada inti akan terus berubah secara periodik dari arah positif ke arah negatif [15].

Beberapa jenis rugi-rugi transformator di antaranya sebagai berikut :

a. Rugi Histeresis

Setiap kali terjadi pembalikan arah arus listrik, fluks magnetik pada inti transformator juga akan berubah arah. Proses perubahan fluks magnetik yang terus-menerus terbentuk dan kemudian runtuh secara berulang inilah yang menyebabkan timbulnya rugi histerisis. Rugi ini muncul karena energi diperlukan untuk membalikkan arah magnetisasi

partikel-partikel dalam inti besi setiap kali terjadi perubahan arah arus bolak-balik.

b. Rugi Arus Eddy

Rugi arus Eddy merupakan kerugian daya yang disebabkan oleh munculnya arus pusar (*eddy current*) di dalam inti besi transformator. Karena inti besi bersifat konduktor, perubahan medan magnet yang terjadi di dalamnya akan menginduksi tegangan listrik. Tegangan induksi ini kemudian memunculkan arus kecil yang berputar di dalam inti besi, sehingga menghasilkan panas dan menimbulkan rugi daya pada transformator.

c. Rugi Fluks Bocor

Rugi ini muncul akibat medan magnet yang terbentuk karena tidak semua garis fluks magnet dari lilitan primer dan sekunder dapat mengalir sepenuhnya melalui inti besi. Sebagian garis fluks tersebut justru menyebar ke udara di sekitar lilitan dan tidak saling berhubungan antara lilitan primer maupun sekunder, sehingga menyebabkan terjadinya rugi fluks bocor (*leakage flux loss*).

d. Rugi Tembaga

Rugi tembaga merupakan kerugian daya yang timbul pada konduktor atau kawat tembaga yang digunakan sebagai bahan utama kumparan transformator. Jenis rugi ini terjadi akibat adanya hambatan listrik (resistansi) pada bahan konduktor, yang menyebabkan sebagian energi listrik berubah menjadi energi panas saat arus mengalir melalui kumparan.

Rugi Tembaga dinyatakan dalam persamaan

$$Pt_2 = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times Pt_1 \quad (1)$$

$$R_{total} = \text{Rugi tembaga} + \text{Rugi Inti} \quad (2)$$

Dimana =

Pt_2 = Perhitungan rugi tembaga (kW)

S_2 = Daya Semu (VA)

S_1 = Rated Power Trafo (MVA)

P_{t1} = Load Loses (kW)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum R_{ugi} - R_{ugi}} \times 100\% \quad [5]$$

2.2.4 Efisiensi Transformator

Efisiensi transformator diukur dari perbandingan daya listrik yang diterima pada sisi masukan dan yang berhasil keluar dari sisi keluaran. Secara teoritis, transformator ideal memiliki efisiensi sebesar 100%, namun dalam praktiknya nilai tersebut sulit dicapai karena adanya berbagai rugi-rugi energi yang menyebabkan sebagian daya listrik berubah menjadi energi panas atau energi gerak [19]. Besarnya efisiensi transformator dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

$$P_{in} = P_{gen} - (P_{gen.ext} + P_{uat}) \quad (2)$$

Dimana :

P_{gen} = Daya Generator (MW)

$P_{gen.ext}$ = Daya untuk eksitasi generator/ *Generator excitation power* (MW)

P_{uat} = Daya *Unit auxiliary Transformer*/ Transformator Bantu (MW)

η = Efisiensi (%)

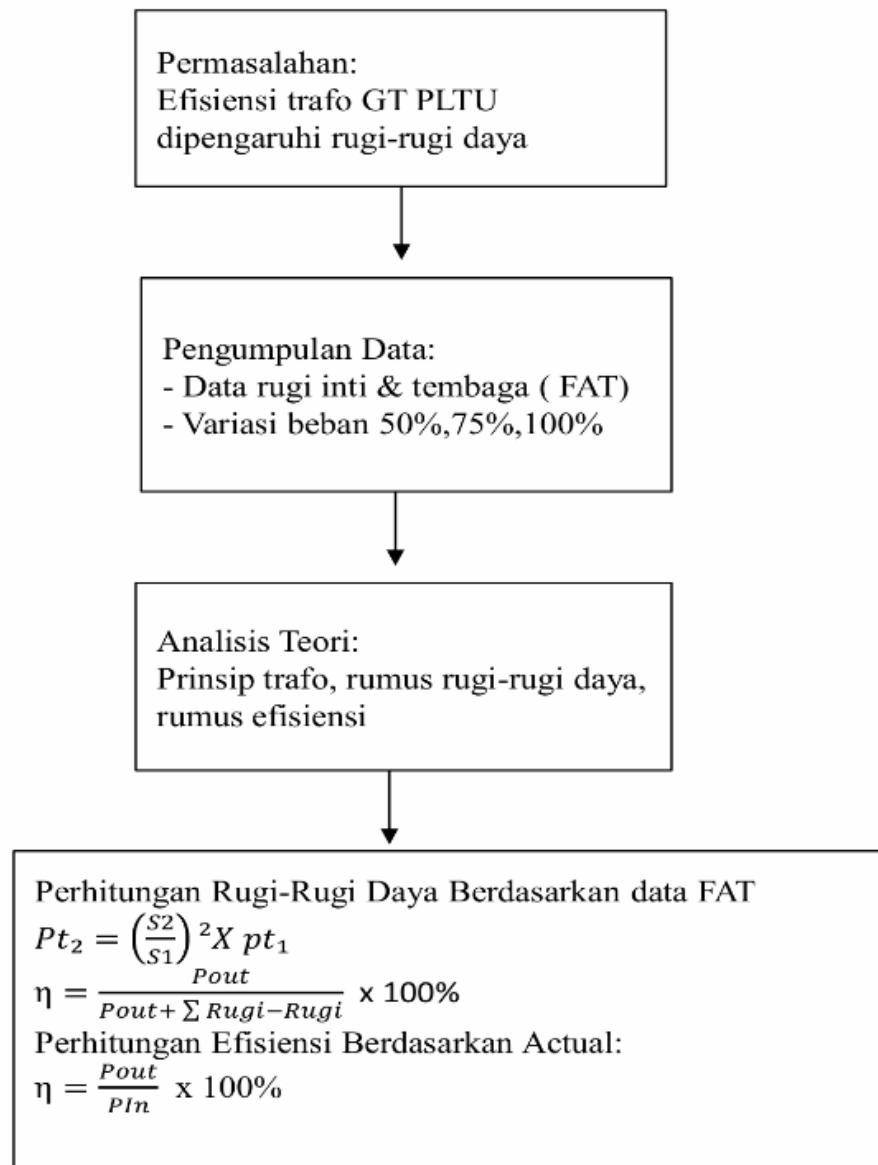
P_{in} = Daya masuk (MW)

P_{out} = Daya keluar (MW)

2.3 Kerangka Pemikiran

Transformator Generator Step-Up (GT) pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) memiliki peran vital dalam proses penyaluran daya, yaitu menaikkan tegangan keluaran generator ke level Sistem 20kV. Efisiensi transformator menjadi parameter penting karena menentukan seberapa besar daya keluaran generator dapat dimanfaatkan secara efektif setelah melalui proses transformasi. Dalam praktiknya, nilai efisiensi transformator dipengaruhi oleh dua komponen utama rugi-rugi daya, yaitu rugi inti yang relatif konstan serta rugi tembaga yang bergantung pada variasi beban. Oleh karena itu,

analisis efisiensi transformator GT perlu dilakukan berdasarkan data operasi aktual untuk mengetahui efisiensi transformator GT pada kondisi beban berbeda. Hasil analisis ini dapat memberikan gambaran kinerja transformator, perbandingan dengan standar maupun nilai ideal, serta menjadi dasar rekomendasi untuk meningkatkan atau mempertahankan efisiensi Transformator. Dari penjelasan yang telah disampaikan, peneliti menggambarkan kerangka pemikiran penelitian ini sebagai berikut :



Gambar 2.17 Kerangka Pemikiran Efisiensi Transformator