

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Relevan

Pada penelitian ini dilakukan tinjauan literatur untuk menemukan referensi yang relevandengan pokok bahasan penelitian ini. Referensi ini dapat berasal dari buku, artikel, jurnal,atau proposal skripsi yang relevan.

“Analisis pengaruh *tap Transformer* terhadap susut daya pada penyulang distribusi 20 kV” Penelitian yang dilakukan oleh A. Makkulau, I. Gunawan, and S. Hadi. pada tahun 2019 mengkaji pengaruh perubahan posisi *tap Transformer* terhadap besaran susut daya pada penyulang distribusi 20 kV di PT PLN (Persero) Area Makassar Selatan. Penelitian ini menggunakan metode pengukuran langsung pada 15 gardu distribusi dengan berbagai variasi beban. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyesuaian *tap Transformer* dari posisi normal ke posisi yang lebih optimal dapat menurunkan susut daya hingga 12-18% tergantung karakteristik beban. Penelitian ini juga menemukan bahwa perbaikan profil tegangan di sisi sekunder *Transformer* berbanding lurus dengan penurunan arus beban, sehingga *Losses* akibat impedansi kabel dapat diminimalkan [7]. Penelitian Makkulau yang mengkaji 15 gardu sekaligus dengan fokus pada penyulang tegangan menengah 20 kV, sedangkan penelitian ini melakukan studi mendalam pada satu gardu spesifik (BNB 70) dengan fokus pada jaringan tegangan rendah. Kelebihan penelitian ini adalah analisis yang lebih detail terhadap kondisi aktual lapangan dan perhitungan penghematan biaya operasional yang spesifik untuk satu gardu, sehingga lebih aplikatif untuk implementasi langsung.

“Optimasi Susut Teknis Jaringan Tegangan Rendah Melalui Penyesuaian *Tap Transformer* Distribusi” Penelitian yang dilakukan oleh Bambang Winardi dan Agus Supardi. pada tahun 2020 yang fokus pada optimasi susut teknis di jaringan tegangan rendah melalui penyesuaian *tap Transformer* pada gardu distribusi di wilayah Semarang. Penelitian ini menggunakan kombinasi antara pengukuran lapangan dan simulasi *software ETAP* untuk memodelkan berbagai skenario penyesuaian *tap*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan melakukan penyesuaian *tap* dari posisi nominal

ke posisi +5%, diperoleh penurunan susut teknis rata-rata sebesar 8,7% pada kondisi beban puncak dan 6,2% pada kondisi beban normal. Penelitian ini juga menghitung potensi penghematan biaya operasional tahunan yang dapat mencapai Rp 45 juta per gardu distribusi [8]. Penelitian Winardi menggunakan pendekatan simulasi *software ETAP* untuk validasi, sedangkan penelitian ini lebih menekankan pada pengukuran langsung dan implementasi aktual di lapangan tanpa simulasi. Keunggulan penelitian ini adalah memberikan data riil dari kondisi operasional sebenarnya di Gardu BNB 70 ULP Beureunun, sehingga hasilnya lebih mencerminkan kondisi aktual dan dapat langsung diterapkan tanpa perlu tahap simulasi tambahan.

“Evaluasi Pengaruh Pengaturan *Tap Transformator* Terhadap Kualitas Tegangan dan *Losses* Pada Jaringan Distribusi” Penelitian yang dilakukan oleh R. Firmansyah, Y. Prasetyo, and D. Nugroho. pada tahun 2021 mengevaluasi pengaruh pengaturan *tap Transformator* terhadap kualitas tegangan dan *Losses* pada jaringan distribusi di PT PLN (Persero) UP3 Bandung. Penelitian ini melakukan pengukuran pada 25 gardu distribusi dengan karakteristik beban yang berbeda, mulai dari beban residensial, komersial, hingga industri kecil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaturan *tap* yang tepat tidak hanya menurunkan susut teknis sebesar 10-15%, tetapi juga memperbaiki *voltage drop* pada ujung jaringan dari semula 8-12% menjadi 3-5%. Penelitian ini juga mengembangkan matriks keputusan untuk menentukan posisi *tap* optimal berdasarkan profil beban harian dan karakteristik jaringan [9]. Penelitian Firmansyah mencakup 25 gardu dengan berbagai jenis beban untuk membuat matriks keputusan umum, sedangkan penelitian ini fokus pada satu gardu (BNB 70) dengan analisis karakteristik beban yang lebih spesifik dan mendalam. Penelitian ini memberikan kontribusi berupa studi kasus detail yang dapat menjadi acuan praktis untuk gardu-gardu dengan karakteristik serupa di wilayah ULP Beureunun, termasuk analisis ekonomis yang lebih terperinci.

“Studi Penurunan Rugi-Rugi Daya Pada Jaringan Distribusi Dengan Metode Optimasi *Tap Transformator*” Penelitian yang dilakukan oleh Hendra Kusuma dan Dedy Kurnia pada tahun 2018 yang mengkaji penurunan rugi-rugi daya pada jaringan distribusi menggunakan metode optimasi *tap Transformator* di wilayah PLN Area Surabaya Utara. Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis beban 24 jam untuk menentukan pola pembebanan dan waktu optimal melakukan penyesuaian *tap*. Hasil penelitian

menunjukkan bahwa dengan melakukan penyesuaian *tap* pada jam-jam beban puncak, dapat diperoleh penurunan *Losses* sebesar 14,3% dibandingkan dengan kondisi *tap* tetap pada posisi nominal. Penelitian ini juga menghitung bahwa energy saving yang dicapai mencapai 1.250 kWh per bulan per gardu [10]. Penelitian Kusuma menggunakan pendekatan waktu optimal (penyesuaian *tap* pada jam tertentu), sedangkan penelitian ini menganalisis dampak penyesuaian *tap* secara permanen untuk kondisi operasional normal. Keunggulan penelitian ini adalah memberikan solusi yang lebih praktis dan mudah diimplementasikan karena tidak memerlukan penyesuaian *tap* secara berkala sesuai waktu, melainkan menemukan satu posisi *tap* optimal yang dapat digunakan untuk berbagai kondisi beban di Gardu BNB 70.

“Implementasi Optimasi Tegangan Jaringan Distribusi Untuk Mengurangi Susut Energi Listrik” Penelitian yang dilakukan oleh M. Irfan, R. Syahputra, and F. Husnayain pada tahun 2022 mengimplementasikan optimasi tegangan jaringan distribusi untuk mengurangi susut energi listrik di PT PLN (Persero) ULP Medan Kota. Penelitian ini tidak hanya fokus pada penyesuaian *tap Transformator*, tetapi juga mengkaji pengaruh kondisi jaringan seperti panjang kabel, jenis penghantar, dan keseimbangan beban antar fasa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan mengoptimalkan *tap Transformator* dan memperbaiki keseimbangan beban, total susut energi dapat diturunkan hingga 16,8%. Penelitian ini juga mengembangkan model matematis untuk memprediksi besar susut energi berdasarkan variabel tegangan, arus, dan impedansi jaringan [11]. Penelitian Irfan menggunakan pendekatan multi-variabel yang mencakup keseimbangan beban dan kondisi jaringan, sedangkan penelitian ini secara spesifik fokus pada optimasi *tap Transformator* sebagai solusi tunggal yang hemat biaya. Kontribusi unik penelitian ini adalah menunjukkan efektivitas satu metode intervensi (penyesuaian *tap*) tanpa perlu investasi tambahan untuk perbaikan jaringan, sehingga lebih feasible untuk diterapkan dalam kondisi keterbatasan anggaran operasional PLN.

“Susut teknis yang terjadi pada jaringan tegangan rendah akibat penurunan tegangan yang dipicu oleh peningkatan beban pelanggan”. Penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Siregar dan Budi Nugroho pada tahun 2020 Penelitian ini menggunakan metode analisis perhitungan rugi-rugi daya berdasarkan data arus beban, panjang penghantar, dan karakteristik konduktor jaringan distribusi. Hasil penelitian

menunjukkan bahwa penurunan tegangan menyebabkan peningkatan arus beban secara signifikan, yang selanjutnya meningkatkan rugi-rugi daya pada penghantar jaringan sesuai dengan prinsip I²R. Penelitian ini menegaskan bahwa kondisi tegangan yang berada di bawah standar menjadi salah satu faktor dominan penyebab tingginya susut teknis pada jaringan distribusi. Penelitian Siregar dan Nugroho berfokus pada analisis penyebab susut teknis tanpa membahas solusi teknis perbaikannya, sedangkan penelitian ini tidak hanya menganalisis hubungan antara tegangan dan susut teknis, tetapi juga menerapkan pengaturan *tap Transformer* sebagai solusi untuk memperbaiki tegangan dan menurunkan susut teknis secara terukur pada Gardu Distribusi BNB 70. Dengan demikian, penelitian ini memiliki keunggulan dalam aspek penerapan solusi teknis yang lebih aplikatif. [12]

“mengevaluasi kinerja *Transformer* distribusi berdasarkan variasi pembebanan dan perubahan tegangan keluaran.” Penelitian yang dilakukan oleh T. Wibowo dan D. Santoso pada tahun 2022. Penelitian ini menggunakan metode studi kasus dengan pengambilan data beban *Transformer*, tegangan primer, serta tegangan sekunder pada beberapa kondisi operasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Transformer* distribusi yang beroperasi mendekati beban maksimum cenderung mengalami penurunan tegangan sekunder yang cukup signifikan serta peningkatan rugi-rugi daya, yang berdampak pada menurunnya efisiensi penyaluran energi listrik. Penelitian ini memberikan gambaran umum mengenai hubungan antara tingkat pembebanan *Transformer* dan kualitas tegangan keluaran. Penelitian Wibowo dan Santoso bersifat evaluatif terhadap kinerja *Transformer* secara umum, sedangkan penelitian ini berfokus pada optimasi kinerja *Transformer* melalui pengaturan *tap* sebagai upaya untuk memperbaiki tegangan sekunder sekaligus menurunkan susut teknis jaringan distribusi tegangan rendah. Keunggulan penelitian ini adalah analisis yang lebih spesifik terhadap satu gardu distribusi dengan kondisi aktual lapangan. [13]

“optimasi sistem distribusi tenaga listrik melalui pengaturan *tap Transformer* distribusi” Penelitian yang dilakukan oleh Lukman Hakim dan Nabila Putri pada tahun 2023 membahas dengan tujuan meningkatkan kualitas tegangan dan efisiensi penyaluran energi listrik. Penelitian ini menggunakan metode komparatif dengan membandingkan kondisi sistem sebelum dan sesudah dilakukan pengaturan *tap* pada beberapa gardu

distribusi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaturan *tap Transformator* yang tepat mampu meningkatkan kualitas tegangan, menurunkan arus beban, serta mengurangi rugi-rugi daya pada jaringan distribusi secara keseluruhan. Penelitian Hakim dan Putri dilakukan pada beberapa gardu distribusi dengan pendekatan umum, sedangkan penelitian ini secara khusus difokuskan pada Gardu Distribusi BNB 70 dengan analisis yang lebih mendalam terhadap kondisi aktual lapangan. Kelebihan penelitian ini adalah adanya perhitungan detail terhadap perubahan susut teknis dan potensi penghematan operasional yang spesifik untuk satu gardu, sehingga hasil penelitian lebih relevan untuk implementasi langsung oleh unit distribusi. [14]

2.2 Landasan Teori

Berikut ini adalah beberapa teori yang mendukung pembahasan dalam skripsi ini dan memiliki kaitan langsung dengan topik yang dibahas, di antaranya :

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan salah satu komponen utama dalam keseluruhan sistem ketenagalistrikan yang berperan penting dalam memastikan energi listrik dapat tersalurkan dari pusat pembangkit hingga ke pengguna akhir. Sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai jalur penghantar energi, *tetapi* juga sebagai pengatur kualitas dan kestabilan pasokan listrik yang diterima oleh masyarakat, industri, maupun fasilitas publik. Tanpa adanya sistem distribusi yang andal, energi yang dihasilkan oleh pembangkit tidak akan dapat dimanfaatkan secara optimal oleh konsumen.

Pada tahap awal pembangkitan, energi listrik umumnya dihasilkan pada level tegangan menengah, biasanya berkisar antara 11 kV hingga 24 kV, tergantung pada jenis dan kapasitas pembangkit yang digunakan. Tegangan ini belum sesuai untuk disalurkan dalam jarak yang sangat jauh, sehingga perlu ditingkatkan terlebih dahulu di gardu induk menggunakan *Transformator* penaik tegangan (*step-up transformer*). Melalui proses ini, tegangan dinaikkan hingga mencapai sekitar 500 kV sebelum dialirkan melalui jaringan transmisi tegangan tinggi.

Peningkatan tegangan tersebut memiliki tujuan utama untuk meminimalkan rugi-rugi daya selama proses penyaluran energi listrik. Secara teori, kehilangan daya pada

saluran transmisi berbanding lurus dengan kuadrat arus yang mengalir melalui penghantar. Dengan menaikkan tegangan, arus yang diperlukan untuk menyalurkan daya yang sama menjadi lebih kecil, sehingga panas yang timbul pada kabel transmisi berkurang dan efisiensi sistem meningkat secara signifikan.

Setelah energi listrik melewati jaringan transmisi, tegangan yang sangat tinggi tersebut tidak dapat langsung digunakan oleh konsumen. Oleh karena itu, tegangan kembali diturunkan di gardu induk distribusi menggunakan *Transformator* penurun tegangan (step-down transformer) menjadi sekitar 20 kV. Selanjutnya, energi listrik disalurkan melalui jaringan distribusi menengah hingga mencapai *Transformator* distribusi yang lebih kecil. Pada tahap akhir, tegangan kembali diturunkan menjadi 220/380 V, yang merupakan standar tegangan rendah yang aman dan sesuai untuk kebutuhan rumah tangga maupun industri kecil.

Berdasarkan proses tersebut, dapat dipahami bahwa sistem distribusi memiliki peran yang sangat strategis dalam rantai penyediaan tenaga listrik. Sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai penghantar energi, *tetapi* juga sebagai pengatur kualitas, keamanan, dan keandalan pasokan listrik yang diterima oleh konsumen.

Dalam praktiknya, penyaluran daya listrik dalam jarak yang jauh selalu dilakukan pada tegangan setinggi mungkin menggunakan *Transformator* step-up. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya operasional akibat kehilangan daya yang berlebihan. Namun, penggunaan tegangan yang sangat tinggi juga memiliki konsekuensi tersendiri.

Tegangan ultra tinggi pada jaringan transmisi dapat menimbulkan risiko keselamatan bagi lingkungan sekitar, seperti potensi bahaya listrik, gangguan elektromagnetik, serta kebutuhan ruang yang lebih luas untuk infrastruktur jaringan. Selain itu, peralatan yang digunakan pada sistem tegangan tinggi memiliki biaya investasi yang sangat mahal, baik dari segi material maupun teknologi yang diperlukan.

Karena tegangan yang sangat tinggi tidak sesuai dengan kebutuhan beban atau peralatan listrik konsumen, maka pada pusat-pusat beban tegangan harus diturunkan kembali menggunakan *Transformator* step-down. Proses penurunan tegangan ini memastikan bahwa listrik yang sampai ke pelanggan berada pada level yang aman, stabil, dan sesuai standar pemakaian.

Jika ditinjau dari perubahan nilai tegangan sepanjang jalur penyaluran, mulai dari pembangkit hingga ke konsumen, terdapat beberapa tingkat tegangan yang berbeda-beda. Setiap tahap memiliki fungsi spesifik, mulai dari efisiensi transmisi hingga keamanan dan kenyamanan penggunaan listrik oleh masyarakat. [15]

Secara umum, sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu:

A. Pembangkit

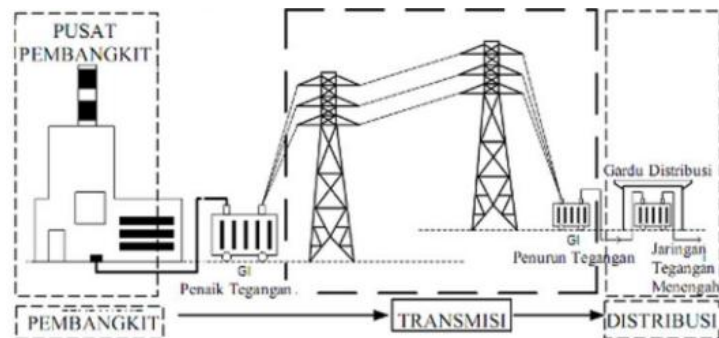
Pembangkit merupakan sumber utama energi listrik yang mengubah berbagai bentuk energi primer menjadi energi listrik. Contohnya meliputi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), serta jenis pembangkit lainnya.

B. Transmisi

Sistem transmisi berfungsi sebagai jaringan utama yang menyalurkan energi listrik dalam jarak jauh dari pusat pembangkit menuju gardu induk distribusi. Jaringan ini beroperasi pada tegangan sangat tinggi untuk meminimalkan kehilangan daya.

C. Distribusi

Sistem distribusi merupakan jaringan terakhir dalam rantai penyaluran energi listrik yang bertugas mengalirkan listrik dari gardu induk hingga ke pelanggan. Pada tahap ini, tegangan disesuaikan agar aman dan sesuai dengan kebutuhan konsumen.



Gambar 2. 1 Komponen utama pada penyaluran tenaga listrik

Berdasarkan tingkat tegangannya, jaringan distribusi tenaga listrik secara umum dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian utama, yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder. Pembagian ini dilakukan untuk mempermudah pengelolaan sistem, meningkatkan keandalan penyaluran energi, serta menyesuaikan level tegangan dengan kebutuhan teknis dan keselamatan.

Berdasarkan tingkat tegangannya, jaringan distribusi tenaga listrik secara umum dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian utama, yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder. Pembagian ini dilakukan untuk mempermudah pengelolaan sistem, meningkatkan keandalan penyaluran energi, serta menyesuaikan level tegangan dengan kebutuhan teknis dan keselamatan.

1. Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer merupakan jaringan yang menghubungkan gardu induk (GI) dengan gardu distribusi. Pada bagian ini, energi listrik masih berada pada level tegangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan yang digunakan oleh konsumen akhir. Oleh karena itu, jaringan ini sering disebut sebagai jaringan tegangan menengah (JTM). Secara operasional, jaringan distribusi primer berfungsi sebagai perantara antara sistem transmisi bertegangan tinggi dengan sistem distribusi yang lebih dekat ke beban. Di Indonesia, standar tegangan yang digunakan pada jaringan distribusi primer umumnya berada pada level 6 kV, 10 kV, dan 20 kV sesuai ketentuan PLN. Pemilihan level tegangan ini mempertimbangkan efisiensi penyaluran daya, biaya infrastruktur, serta karakteristik beban di suatu wilayah.

2. Jaringan Distribusi Sekunder

Jaringan distribusi sekunder adalah bagian terakhir dari sistem distribusi yang menyalurkan energi listrik dari gardu distribusi hingga ke pelanggan atau pusat-pusat beban. Jaringan ini beroperasi pada tegangan rendah sehingga lebih aman untuk digunakan oleh masyarakat umum. Oleh sebab itu, jaringan ini dikenal sebagai jaringan tegangan rendah (JTR). Standar tegangan yang digunakan pada jaringan distribusi sekunder adalah 220/380 V, yang sesuai dengan kebutuhan peralatan listrik rumah tangga maupun industri kecil.

3. Susut Energi Listrik

Dalam proses penyaluran tenaga listrik mulai dari pembangkit, transmisi, hingga distribusi ke pelanggan, selalu terjadi kehilangan energi atau susut listrik. Susut ini tidak dapat dihindari sepenuhnya karena berkaitan dengan sifat fisik peralatan dan kondisi operasional jaringan. Secara umum, susut energi listrik dapat dikategorikan menjadi dua jenis utama, yaitu susut teknis dan susut non-teknis.

Susut teknis terjadi akibat karakteristik elektrik dari komponen sistem tenaga listrik, seperti saluran transmisi, *Transformator* di gardu induk, jaringan distribusi tegangan menengah, *Transformator* distribusi, serta jaringan tegangan rendah. Ketika arus listrik mengalir melalui peralatan tersebut, sebagian energi berubah menjadi panas dan hilang ke lingkungan. Kehilangan energi inilah yang diklasifikasikan sebagai susut teknis.

Sementara itu, susut non-teknis disebabkan oleh faktor manusia, terutama pemakaian listrik secara ilegal. Hal ini mencakup pencurian listrik oleh pelanggan maupun pihak luar yang tidak terdaftar sebagai pelanggan PLN. Kehilangan energi akibat praktik ilegal ini tidak berkaitan dengan aspek teknis jaringan, *tetapi* lebih pada masalah pengawasan dan penegakan aturan.

2.2.2 Susut Teknis

Susut teknis merupakan kehilangan energi listrik yang terjadi secara alami dalam sistem kelistrikan akibat sifat resistif dari peralatan dan jaringan. Ketika arus mengalir melalui penghantar dan *Transformator*, sebagian energi listrik dikonversi menjadi panas sehingga tidak sampai ke pelanggan. Fenomena ini terjadi pada seluruh bagian sistem, mulai dari jaringan transmisi, gardu induk, jaringan tegangan menengah, *Transformator* distribusi, hingga jaringan tegangan rendah.

Pada sistem distribusi tegangan rendah, kontribusi susut teknis mencapai sekitar 80% dari total susut distribusi. Hal ini menunjukkan bahwa perbaikan dan optimalisasi jaringan tegangan rendah menjadi prioritas utama dalam upaya menekan kehilangan energi listrik secara keseluruhan.

2.2.3 Susut Non-Teknis

Susut non-teknis merujuk pada kehilangan energi listrik akibat pemakaian yang tidak sah atau ilegal. Praktik ini biasanya dilakukan dengan cara memanipulasi alat pembatas dan pengukur (APP), merusak meteran listrik, atau melakukan penyambungan liar pada jaringan distribusi. Selain itu, pencurian listrik juga sering terjadi pada tiang jaringan tegangan rendah oleh pihak yang bukan pelanggan resmi.

Beberapa faktor utama penyebab susut listrik antara lain:

A. Susut pada saluran penghantar

Setiap penghantar listrik memiliki nilai resistansi yang melekat pada materialnya. Ketika arus listrik mengalir melalui kabel, resistansi ini menyebabkan sebagian energi listrik berubah menjadi energi panas yang dilepaskan ke lingkungan. Semakin besar arus yang mengalir dan semakin tinggi resistansi kabel, maka semakin besar pula energi yang hilang dalam bentuk panas. Oleh karena itu, kualitas material penghantar, panjang kabel, serta kondisi fisiknya sangat berpengaruh terhadap besarnya susut daya pada saluran distribusi.

B. Kesalahan pengukuran

Susut energi juga dapat terjadi akibat ketidakakuratan dalam sistem pengukuran listrik. Kesalahan ini dapat berasal dari kesalahan pembacaan angka pada kWh meter oleh petugas atau pelanggan, terutama jika pencatatan dilakukan secara manual. Selain itu, ketidaktepatan pada rasio *Transformator* ukur, seperti Current Transformer (CT) dan Potential Transformer (PT), dapat menyebabkan hasil pengukuran tidak sesuai dengan energi listrik yang sebenarnya mengalir. Jika alat ukur tidak dikalibrasi dengan baik atau mengalami kerusakan, maka energi yang terpakai bisa tercatat lebih kecil dari kenyataannya.

C. Ketidakseimbangan beban

Pada kondisi ideal, beban pada setiap fasa dalam sistem tiga fasa harus seimbang sehingga arus pada kawat netral bernilai nol. Namun dalam praktiknya, distribusi beban sering kali tidak merata antar fasa akibat pola pemakaian listrik yang berbeda-beda. Ketidakseimbangan ini menyebabkan arus mengalir pada kawat netral, yang kemudian menghasilkan rugi-rugi daya tambahan dalam bentuk panas. Semakin besar ketidakseimbangan beban, semakin besar pula arus netral dan susut daya yang terjadi.

D. Kontak sambungan yang buruk (loss contact)

Sambungan antar kabel yang tidak rapat atau sudah mengalami korosi dapat menimbulkan resistansi kontak yang tinggi. Kondisi ini menyebabkan sebagian energi listrik hilang dalam bentuk panas pada titik sambungan. Selain meningkatkan rugi daya, sambungan yang buruk juga berpotensi menimbulkan percikan api, panas berlebih, bahkan kerusakan pada jaringan. Faktor lingkungan seperti kelembapan, getaran, serta masuknya benda asing (misalnya ranting pohon) juga dapat memperburuk kualitas sambungan.

E. Penampang kabel terlalu kecil

Ukuran penampang kabel berbanding terbalik dengan nilai resistansinya. Artinya, semakin kecil diameter kabel, semakin besar resistansi yang dimiliki penghantar tersebut. Akibatnya, ketika arus mengalir, rugi-rugi daya yang terjadi akan semakin besar. Oleh karena itu, pemilihan ukuran kabel harus disesuaikan dengan besar arus yang akan dialirkan agar susut daya dapat diminimalkan..

F. Panjang jaringan

Semakin panjang suatu jaringan distribusi, semakin besar total resistansi yang dimiliki saluran tersebut. Hal ini menyebabkan penurunan tegangan (drop voltage) di sepanjang jaringan serta meningkatnya kehilangan energi listrik. Pada jaringan yang sangat panjang, sebagian besar daya dapat hilang sebelum mencapai konsumen, sehingga efisiensi penyaluran energi listrik menjadi rendah..

G. Terlalu banyak percabangan

Banyaknya percabangan pada jaringan distribusi, terutama pada sambungan rumah (SR), meningkatkan kompleksitas sistem dan jumlah titik sambungan. Setiap titik sambungan memiliki potensi menimbulkan resistansi tambahan yang berkontribusi terhadap rugi daya. Selain itu, semakin banyak percabangan, semakin sulit menjaga keseimbangan beban dan kualitas tegangan di setiap titik jaringan.

H. Arus tidak seimbang antar fasa

Ketidakseimbangan arus antar fasa menyebabkan sebagian arus mengalir ke tanah melalui sistem pentanahan. Arus yang mengalir ke tanah ini menimbulkan rugi tambahan akibat resistansi tanah yang relatif tinggi. Meskipun sistem pentanahan netral sudah dipasang, terkadang sistem tersebut tidak mampu mengalirkan seluruh arus netral secara efektif, sehingga susut daya *tetap* terjadi.

I. Faktor daya rendah ($\cos \phi$ rendah)

Faktor daya yang rendah menunjukkan bahwa sebagian besar daya yang mengalir dalam sistem bersifat reaktif dan tidak dimanfaatkan secara langsung oleh beban. Daya reaktif ini tetap membebani jaringan dan menyebabkan arus yang mengalir menjadi lebih besar dari yang seharusnya. Akibatnya, rugi-rugi daya meningkat, tegangan menjadi kurang stabil, dan efisiensi sistem distribusi menurun.

2.2.4 Susut Pada Sistem Distribusi

Susut energi dapat dipahami sebagai fenomena berkurangnya energi listrik selama proses penyaluran, di mana besaran energi yang dikirim dari sumber pembangkit tidak sepenuhnya sampai ke sisi penerima. Hal ini terjadi karena sebagian energi hilang akibat berbagai faktor teknis dalam sistem kelistrikan, terutama terkait dengan sifat konduktor dan kondisi operasional jaringan.

2.2.4.1 Susut pada Jaringan Tegangan Menengah

Jaringan Tegangan Menengah (JTM) merupakan bagian penting dalam sistem distribusi tenaga listrik yang berperan menyalurkan energi dari gardu induk bertegangan 20 kV menuju *Transformator* distribusi. Pada tahap ini, tegangan kemudian diturunkan menjadi 220/380 V agar dapat digunakan oleh pelanggan rumah tangga maupun komersial. Meskipun demikian, terdapat pula konsumen tertentu, khususnya industri skala besar, yang memperoleh pasokan langsung pada level 20 kV sesuai dengan kebutuhan operasional mereka.

Dalam sistem JTM, susut energi terutama disebabkan oleh hambatan atau resistansi yang terdapat pada penghantar listrik di sepanjang jalur distribusi. Setiap segmen jaringan memiliki karakteristik tahanan yang berbeda, sehingga kontribusi terhadap kehilangan energi juga bervariasi. Semakin panjang jaringan dan semakin besar arus yang mengalir, maka potensi susut energi cenderung meningkat.

Dibandingkan dengan jaringan tegangan rendah, analisis susut pada jaringan tegangan menengah relatif lebih sederhana. Hal ini dikarenakan jumlah segmen jaringan yang lebih sedikit, sehingga proses perhitungan dan evaluasi kehilangan energi dapat dilakukan dengan lebih sistematis dan terukur. Menurut Susanto et al. (2018), pendekatan perhitungan susut energi pada JTM umumnya dilakukan dengan meninjau setiap jurusan atau jalur distribusi secara terpisah untuk memperoleh gambaran yang lebih akurat. Selanjutnya, susut energi per jurusan dalam jaringan tegangan menengah dapat dijelaskan dan dianalisis berdasarkan parameter teknis masing-masing segmen jaringan. [16]

2.2.5 Transformator

Transformator merupakan suatu peralatan listrik statis yang berfungsi untuk mentransfer energi listrik dari satu rangkaian menuju rangkaian lainnya tanpa adanya sambungan listrik secara langsung. Proses perpindahan energi ini berlangsung melalui hubungan magnetik yang tercipta pada inti *Transformator*. Prinsip kerja yang digunakan adalah induksi elektromagnetik, yaitu kemampuan perubahan *fluks* magnet untuk menimbulkan gaya gerak listrik pada kumparan lain yang berada dalam satu jalur magnet. Meskipun mampu mengubah besar tegangan sesuai kebutuhan (baik menaikkan maupun menurunkan), *Transformator* tidak mempengaruhi frekuensi gelombang listrik yang masuk. Dengan demikian, nilai frekuensi pada sisi primer dan sisi sekunder akan tetap sama. Peran *Transformator* sangat penting dalam sistem tenaga listrik karena menghubungkan berbagai level tegangan dari pembangkit hingga ke tahap distribusi ke masyarakat.

Dari segi konstruksinya, *Transformator* pada umumnya tersusun dari sebuah inti besi berlapis yang berfungsi untuk mempermudah aliran *fluks* magnet dan meminimalkan kerugian inti (core Losses). Inti ini dibuat dari lempengan besi silikon yang disusun berlapis-lapis dengan tujuan mengurangi arus eddy (eddy current), sehingga efisiensi *Transformator* dapat meningkat. Di sekitar inti ini, terdapat dua buah kumparan utama yang dikenal sebagai kumparan primer dan kumparan sekunder. Keduanya terbuat dari kawat tembaga yang dililitkan secara teratur pada bagian “kaki” inti. Lilitan-lilitan ini akan menentukan besar tegangan keluaran karena perbandingan jumlah lilitan primer dan sekunder akan mempengaruhi nilai tegangan hasil induksi. [15].

Jika dilihat dari bentuk struktur pembuatannya, *Transformator* dapat dibedakan menjadi dua tipe utama, yaitu tipe inti (core type) dan tipe cangkang (shell type). Pada tipe inti, *fluks* magnet lebih banyak mengalir pada dua kaki utama, dan masing-masing kaki dililitkan satu kumparan. Desain ini membuat kumparan lebih mudah dipasang dan memberikan akses perawatan yang lebih sederhana. Sedangkan pada tipe cangkang, inti besi memiliki tiga kaki dan kumparan ditempatkan di kaki tengah. Pada tipe ini, *fluks* magnet mengalir pada dua jalur samping sehingga pembagian medan magnet menjadi lebih merata. Tipe cangkang umumnya digunakan untuk *Transformator* dengan

kebutuhan daya besar karena konstruksinya lebih kokoh dan mampu memberikan tingkat perlindungan mekanis yang lebih tinggi terhadap lilitan.

Dua kumparan utama yang terdapat pada *Transformator* dipasang pada inti besi lunak untuk memaksimalkan pembentukan *fluks* magnet. Kedua kumparan ini memiliki jumlah lilitan yang berbeda, dan perbedaan inilah yang menentukan apakah *Transformator* termasuk ke dalam kategori step-up (menaikkan tegangan) atau step-down (menurunkan tegangan). Selain itu, kumparan primer terhubung langsung dengan sumber tegangan AC, sedangkan kumparan sekunder menghasilkan tegangan keluaran yang dapat digunakan untuk kebutuhan tertentu, baik dalam sistem rumah tangga, industri, maupun jaringan tenaga listrik skala besar.

Dalam konteks penggunaannya di sistem ketenagalistrikan, *Transformator* dapat dibagi menjadi beberapa kelompok berdasarkan fungsi dan kapasitasnya, antara lain:

1. *Transformator* Daya (Power Transformer)

Transformator daya digunakan dalam jaringan transmisi tegangan tinggi untuk menghubungkan pembangkit listrik dengan sistem transmisi dan distribusi. Unit ini biasanya bekerja pada tegangan tinggi dan kapasitas yang besar. Karena beroperasi dalam kondisi beban berat dan fluktuasi daya yang signifikan, *Transformator* daya didesain dengan sistem pendinginan yang baik, isolasi yang kuat, serta konstruksi yang mampu menahan tekanan termal dan mekanis. Tantangan utama pada *Transformator* ini adalah menjaga stabilitas tegangan, mencegah rugi-rugi daya yang besar, serta mempertahankan umur pakai yang panjang.

2. *Transformator* Distribusi (Distribution Transformer)

Transformator distribusi berfungsi menurunkan tegangan dari jaringan menengah menjadi tegangan rendah yang dapat digunakan oleh pelanggan domestik maupun komersial. *Transformator* jenis ini biasanya ditempatkan dekat dengan area pemukiman atau fasilitas umum agar rugi daya akibat panjang saluran dapat diminimalkan. Faktor yang perlu diperhatikan dalam penggunaan trafo distribusi adalah efisiensi, regulasi tegangan, dan tahanan internal karena berhubungan langsung dengan kualitas daya yang diterima konsumen.

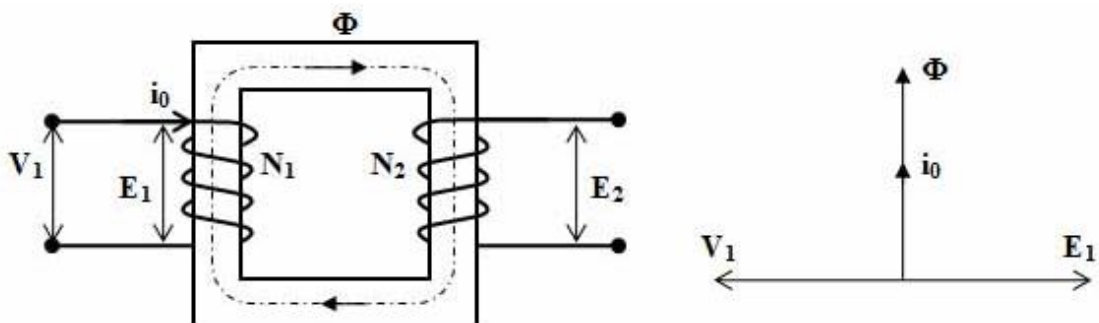
3. *Transformer* Tiga Fasa (Three-Phase Transformer)

Transformer tiga fasa banyak digunakan pada industri dan sistem tenaga listrik berskala besar karena mampu menangani beban yang tinggi secara lebih efisien. Konfigurasi sambungan yang umum digunakan adalah hubungan bintang (Y), delta (Δ), dan zig-zag (Z). Masing-masing konfigurasi memiliki fungsi tertentu, seperti pengaturan tegangan, penyeimbangan beban, hingga mereduksi harmonisa. Cara kerja *Transformer* tiga fasa sebenarnya tidak berbeda jauh dengan *Transformer* satu fasa, hanya saja sistemnya terdiri atas tiga kumparan yang bekerja secara sinkron sehingga menghasilkan suplai tiga fasa yang stabil

2.2.5.1 Keadaan Tanpa Beban (No Load Condition)

Ketika *Transformer* dioperasikan dalam kondisi tanpa beban, artinya hanya kumparan primer yang terhubung ke sumber AC sementara kumparan sekunder tidak dibebani oleh perangkat apa pun. Pada saat tegangan AC V_1 diberikan ke kumparan primer, arus kecil yang disebut arus magnetisasi mulai mengalir. Arus ini bertugas membangkitkan *fluks* magnet pada inti besi. *Fluks* yang berubah-ubah ini kemudian menginduksi gaya gerak listrik (ggl) E_1 pada kumparan primer yang arahnya berlawanan dengan tegangan sumber (hukum Lenz). Karena tidak ada beban pada sisi sekunder, arus yang mengalir sangat kecil, hanya sebatas untuk mempertahankan *fluks* magnet agar tetap stabil. Kondisi ini sangat penting untuk memahami bagaimana *Transformer* membangun medan magnet sebelum menerima beban aktual.

$$\phi = \phi_{\text{maks}} \sin \omega t \dots \dots \dots (2.1)$$



Gambar 2. 2 *Transformer* dalam keadaan tanpa beban

(Sumber: Google, *Transformer* keadaan tanpa beban)

Pada kondisi yang ditunjukkan pada Gambar 2.5, arus yang mengalir pada kumparan primer merupakan arus yang sangat kecil, yaitu arus magnetisasi I_1 . Arus ini hanya berfungsi untuk mempertahankan perubahan *fluks* magnet di dalam inti *Transformator*, sehingga penurunan tegangan atau rugi tegangan pada lilitan primer menjadi sangat kecil dan dapat diabaikan karena tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap tegangan masuk. *Fluks* magnet bolak-balik yang dihasilkan oleh arus primer kemudian menyebar melalui inti besi dan menghubungkan kumparan sekunder. Akibat adanya *fluks* yang berubah secara periodik tersebut, timbul gaya gerak listrik induksi E_2 pada kumparan sekunder. Gaya gerak listrik ini muncul karena prinsip induksi elektromagnetik, yaitu *fluks* yang berubah menyebabkan terbentuknya tegangan pada lilitan lain yang berada dalam satu jalur magnet [17].

Dengan kata lain, meskipun arus primer yang mengalir sangat kecil, arus tersebut cukup untuk membangkitkan *fluks* magnet yang diperlukan untuk menginduksi kumparan sekunder. Proses ini merupakan dasar cara kerja *Transformator*, di mana energi listrik dapat dipindahkan dari satu kumparan ke kumparan lain tanpa adanya sambungan listrik langsung, melainkan melalui perubahan *fluks* magnet di dalam inti. *Fluks* yang bersilasi di dalam inti bertindak sebagai penghubung antara kedua kumparan sehingga memungkinkan terjadinya pembentukan tegangan sekunder meskipun *Transformator* belum dibebani.

Fluks yang sinusoidal ini akan menghasilkan tegangan induksi e_1 .

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$e_1 = -N_1 \frac{d(\phi_{maks} \sin \omega t)}{dt} = -N_1 \omega \phi_{maks} \cos \omega t \dots\dots\dots (2.3)$$

Pada rangkaian sekunder, *fluks* (ϕ) bersama ini menimbulkan :

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$e_2 = -N_2 \omega \phi_{maks} \cos \omega t \dots\dots\dots (2.6)$$

Harga efektif tegangan induksi pada kumparan sekunder trafo sebagai berikut:

$$E_2 = 4,44 N_2 f \Phi_{\text{maks}} \dots \dots \dots (2.7)$$

$$E_2 = 4,44 N_2 f B_m A_{fe} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dari persamaan diatas dapat diperoleh:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots \dots \dots (2.9)$$

Dengan keadaan ideal, rugi-rugi diabaikan sehingga $E_1 = V_1$ dan $E_2 = V_2$, dengan :

V_1 = Tegangan pada sisi primer (V)

V_2 = Tegangan pada sisi sekunder (V)

E_1 = Tegangan induksi sisi primer (V)

E_2 = Tegangan induksi sisi sekunder (V)

N_1 = Jumlah lilitan primer

N_2 = Jumlah lilitan sekunder

I_1 = Arus primer (A)

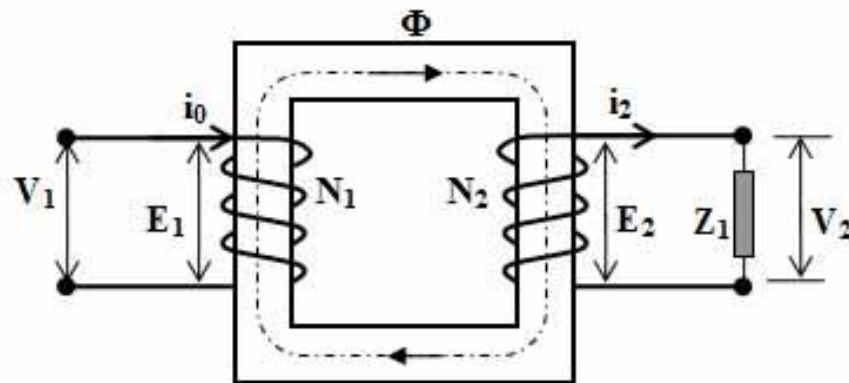
I_2 = Arus sekunder (A)

Dari persamaan diatas dapat diperoleh:

$$e_1 = \frac{N_1}{N_2} V_1 \dots \dots \dots (2.10)$$

Dari persamaan ini tegangan sekunder V_2 berbanding lurus dengan jumlah kumparan sekunder dan tegangan primer dan berbanding terbalik jumlah kumparan primer.

2.2.5.2 Keadaan Berbeban



Gambar 2. 3 *Transformator* keadaan berbeban

(Sumber: Google, *Transformator* keadaan berbeban)

Pada *Transformator* tanpa beban seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4, arus yang diambil dari jaringan listrik terdiri atas dua komponen utama, yaitu arus resistif yang berkaitan dengan rugi-rugi inti, serta arus induktif yang berfungsi untuk membangkitkan *fluks* magnet di dalam inti besi. Arus ini relatif kecil karena *Transformator* belum terhubung dengan beban, sehingga hanya diperlukan energi minimum untuk mempertahankan kondisi magnetisasi inti.

Ketika kumparan sekunder *Transformator* dihubungkan dengan suatu beban Z_L , maka arus beban I_2 mulai mengalir pada sisi sekunder. Besarnya arus tersebut ditentukan oleh perbandingan antara tegangan keluaran V_2 dengan impedansi beban, yang dituliskan dalam persamaan:

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_1} \dots\dots\dots(2.11)$$

Arus yang mengalir pada kumparan sekunder ini menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) sebesar $N_2 I_2$. Gaya magnet tersebut arahnya berlawanan dengan *fluks* utama ϕ yang dibangkitkan oleh kumparan primer akibat arus magnetisasi I_m . Jika gaya magnet yang berasal dari arus beban tidak dikompensasi, maka besar *fluks* di dalam inti akan berubah dan mengganggu kinerja *Transformator*.

Agar *fluks* magnet tetap stabil sesuai nilai kerja yang diinginkan, kumparan primer harus mengalirkan arus tambahan yang besarnya cukup untuk menyeimbangkan ggm akibat arus beban pada sisi sekunder. Dengan kata lain, arus pada sisi primer harus menyesuaikan diri dengan kondisi berbeban untuk mempertahankan kestabilan *fluks*. Oleh sebab itu, arus total yang mengalir pada kumparan primer menjadi gabungan dari arus magnetisasi I_m dan arus yang diakibatkan oleh beban refleksi I_2 , sehingga persamaannya ditulis sebagai:

$$I_1 = I_0 + I_2 \dots \dots \dots (2.12)$$

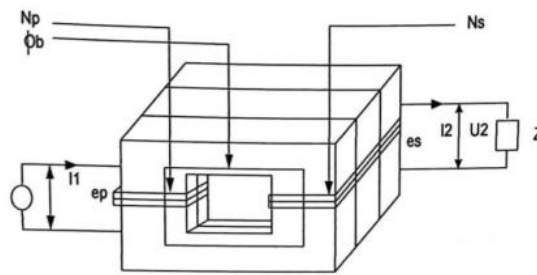
Apabila rugi-rugi inti, khususnya arus rugi besi I_c , diabaikan, maka arus magnetisasi hanya dianggap sebagai arus reaktif I_m . Dengan demikian, arus primer dapat disederhanakan menjadi:

$$I_1 = I_m + I_2 \dots \dots \dots (2.13)$$

Secara keseluruhan, kondisi berbeban pada *Transformator* menyebabkan sisi primer menyesuaikan arus secara otomatis untuk menjaga keseimbangan *fluks* dan memastikan transfer daya berjalan efisien. Prinsip inilah yang memungkinkan *Transformator* bekerja secara stabil meskipun terjadi perubahan pada beban yang terhubung di sisi sekunder.

2.2.5.3 Prinsip kerja *Transformator*

Hukum utama dalam *Transformator* adalah Hukum Induksi Faraday. Menurut hukum ini, suatu gaya listrik melalui garis lengkung yang tertutup, adalah berbanding lurus dengan perubahan persatuan waktu dari pada arus induksi atau flux yang dilingkari oleh garis lengkung itu. Arus induksi atau *fluks* didefinisikan sebagai integral permukaan induksi magnet melalui suatu bidang [15]. Untuk memahami prinsip kerja *Transformator*, dapat dilihat gambar 2.3 berikut.



Gambar 2. 4 Bagian-bagian *Transformer*

Pada *Transformer*, terdapat beberapa parameter penting yang saling berkaitan. Tegangan sumber dilambangkan dengan U_1 , sedangkan gaya gerak listrik (GGL) induksi pada kumparan primer dinyatakan sebagai e_p . Tegangan pada sisi beban atau sekunder dilambangkan dengan U_2 , dan GGL induksi pada kumparan sekunder ditulis sebagai e_s . Arus yang mengalir pada kumparan primer disebut I_1 , sedangkan arus pada sisi sekunder atau beban ditulis I_2 . Jumlah lilitan pada masing-masing kumparan dilambangkan N_p untuk primer dan N_s untuk sekunder. Sementara itu, Φ_b menunjukkan *fluks* magnet bersama yang terbentuk pada inti, dan Z adalah impedansi beban yang terhubung ke sisi sekunder.

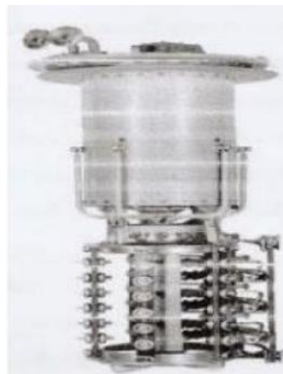
Ketika kumparan primer dihubungkan ke sumber tegangan bolak-balik, arus I_1 akan mengalir melalui lilitan primer. Karena kumparan ini dililit pada inti besi, arus tersebut menghasilkan *fluks* magnet bolak-balik Φ_b di dalam inti. Perubahan *fluks* magnet ini menginduksi gaya gerak listrik (GGL) pada kumparan primer, sesuai dengan hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik. GGL yang timbul di sisi primer ini bersifat menentang perubahan arus penyebabnya, sesuai dengan hukum Lenz. Selain itu, *fluks* magnet yang sama juga memotong lilitan sekunder, sehingga menimbulkan GGL induksi pada sisi sekunder. Besarnya tegangan yang dihasilkan di sisi sekunder bergantung pada rasio jumlah lilitan antara kumparan primer dan sekunder.

2.2.6 Tap Changer

Dalam proses transmisi dan distribusi tenaga listrik, penurunan tegangan (*Losses*) dapat terjadi akibat berbagai faktor. Misalnya, tegangan yang diterima dari pembangkit listrik umumnya telah melalui proses penyaluran yang panjang, sehingga saat memasuki sistem distribusi 20 kV, nilai tegangannya sering kali tidak lagi sesuai dengan standar

ideal. Tegangan di sisi 20 kV tersebut sebenarnya berasal dari hasil penurunan tegangan transmisi menggunakan *Transformer* step-down, yang berfungsi mengubah tegangan tinggi menjadi tegangan distribusi menengah sekitar 20 kV agar sesuai untuk jaringan distribusi. Namun dalam praktiknya, selama proses penyaluran ke konsumen melalui jaringan distribusi, sering kali terjadi kehilangan daya (power loss) dan jatuh tegangan (*voltage drop*). Kondisi ini dapat menimbulkan gangguan pada kestabilan jaringan distribusi serta memengaruhi kontinuitas suplai listrik ke pelanggan.

Salah satu metode efektif untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan melakukan pengaturan *Tap Changer* pada *Transformer* distribusi. *Tap Changer* merupakan perangkat yang berfungsi mengubah rasio lilitan pada sisi primer *Transformer*. Dengan mengatur jumlah lilitan ini, nilai tegangan keluaran pada sisi sekunder dapat disesuaikan agar tetap berada dalam batas normal meskipun terjadi fluktuasi tegangan pada sisi input. Pengaturan *tap* yang tepat dapat membantu menjaga kestabilan tegangan di jaringan distribusi dan sekaligus meminimalkan susut daya yang terjadi selama proses penyaluran listrik. [18].



Gambar 2. 5 *Tap Changer*

2.2.6.1 Fungsi *Tap Changer* pada *Transformer*

Tap Changer pada *Transformer* daya berfungsi untuk menyesuaikan tegangan keluaran agar tetap berada dalam rentang yang diinginkan. Hal ini diperlukan karena tegangan pada sistem jaringan listrik tidak selalu konstan; dapat naik atau turun tergantung kondisi beban dan sistem. Agar *Transformer* tetap mampu menjaga tegangan sesuai nilai nominalnya, maka pada sisi lilitan tegangan tinggi dipasang beberapa titik penyesuaian atau *tap point*.

Melalui pengaturan *tap* ini, operator dapat mengubah rasio lilitan antara sisi primer dan sekunder. Perubahan rasio lilitan tersebut akan memengaruhi besar kecilnya tegangan keluaran *Transformator*. Dengan demikian, ketika terjadi fluktuasi tegangan pada jaringan, *Transformator* masih dapat memberikan tegangan keluaran yang stabil dan sesuai dengan standar operasional.

Tap Changer dapat bekerja dengan dua cara, yaitu dalam keadaan tanpa beban (off-load Tap Changer) dan dalam kondisi berbeban (on-load Tap Changer). Pada tipe *on-load Tap Changer* (OLTC), perpindahan *tap* dapat dilakukan tanpa memutus aliran daya listrik, sehingga proses penyesuaian tegangan bisa dilakukan secara langsung saat *Transformator* sedang beroperasi. Sistem ini bisa dikendalikan secara manual oleh operator maupun otomatis menggunakan sistem kontrol yang mendeteksi perubahan tegangan secara real-time. Dengan penggunaan OLTC, kestabilan tegangan pada jaringan distribusi dapat lebih terjaga meskipun terjadi perubahan beban secara dinamis.

2.2.6.2 On load Tap Changer (OLTC)

Pada tahun 1926, Dr. Bernhard Jansen bersama Oskar dan Richard Scheubeck bersaudara mengembangkan komponen *resistor* dengan kecepatan tinggi yang membuka peluang perubahan rasio pada belitan *Transformator* secara langsung dalam keadaan berbeban. Dengan beberapa penyempurnaan, ketiganya akhirnya menemukan teknologi yang terkenal di berbagai belahan dunia dengan nama “*Reinhausen On Load Tap Changer*”. Dengan membaiknya keandalan dari *on load Tap Changer*, maka kebanyakan dipakai adalah *on load Tap Changer* sekaligus sebagai pengganti dari *on load voltage regulator*. Sejak dikembangkan, dua sistem *switching* telah digunakan untuk proses perpindahan beban, yakni tipe OLTC dengan *resistor* berkecepatan tinggi dan OLTC dengan tipe *reaktor*. OLTC dengan *resistor* berkecepatan tinggi dipasang dalam tanki *Transformator* (*in-tank type*), sementara OLTC tipe reaktor biasanya dipasang di luar *tank* trafo (*compartment type*).



(a)



(b)

Gambar 2. 6 OLTC tipe *compartment* (a) dan *in-tank* (b)

Untuk menjaga agar kualitas tegangan yang diterima pelanggan tetap sesuai standar pelayanan, besar tegangan keluaran *Transformator* perlu dapat diatur sesuai kebutuhan. Oleh karena itu, pada salah satu sisi atau bahkan kedua sisi lilitan *Transformator* biasanya disediakan *tap* atau penyadap, yang berfungsi untuk mengubah rasio transformasi antara sisi primer dan sekunder [19].

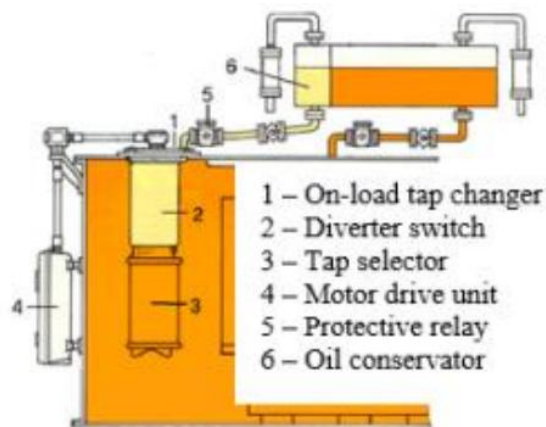
Terdapat beberapa alasan utama mengapa sebuah *Transformator* daya dilengkapi dengan sistem *tapping*, di antaranya:

- Menyesuaikan perubahan tegangan yang muncul akibat variasi dari sistem tenaga utama atau *Transformator* lainnya.
- Menstabilkan tegangan keluaran dengan mengompensasi perubahan internal pada *Transformator* agar tetap berada pada nilai yang diinginkan.
- Pada generator maupun *Transformator* interbus, *tapping* membantu dalam pengaturan aliran daya reaktif (Var control).
- Memberikan fleksibilitas terhadap faktor-faktor yang tidak dapat diprediksi secara tepat pada tahap perencanaan sistem tenaga listrik.
- Menyiapkan *Transformator* agar tetap dapat beradaptasi terhadap perubahan kondisi sistem di masa mendatang.

Namun, di balik manfaat tersebut, penggunaan *tap* pada *Transformator* juga memiliki beberapa keterbatasan dan potensi kerugian, antara lain:

- Pengaturan *tap* menyebabkan variasi kerapatan *fluks* selama operasi, sehingga desain *Transformator* perlu mempertimbangkan kerapatan *fluks* yang sedikit lebih rendah dari kondisi ideal.
- Nilai impedansi *Transformator* dapat berubah sesuai dengan posisi *tap*, sehingga sistem distribusi harus dirancang agar tetap stabil terhadap variasi tersebut.
- Kerugian daya (*Losses*) juga akan berbeda pada setiap posisi *tap*, sehingga sistem pendingin harus dirancang untuk mengantisipasi kemungkinan kerugian maksimum.
- Dalam beberapa posisi *tap*, sebagian lilitan mungkin tidak aktif, yang dapat mengganggu keseimbangan elektromagnetik di dalam *Transformator* dan menimbulkan gaya tak seimbang yang berpotensi menyebabkan gangguan mekanis.
- Adanya tambahan sambungan listrik akibat mekanisme *tap* menambah kompleksitas struktur *Transformator*, sehingga meningkatkan risiko gangguan internal apabila tidak dirawat dengan baik. [20].

2.2.6.3 Bagian-bagian on load Tap Changer



Gambar 2. 7 Posisi OLTC pada trafo daya

On load Tap Changer terdiri atas beberapa komponen utama, yakni tap selector (pemilih tap), diverter switch (saklar pengalih), dan transitional resistor (tahanan transisi). *Tap selector* terdiri atas rangkaian mekanis berupa beberapa terminal yang dapat menentukan perubahan posisi *tap* maupun rasio belitan primer yang aktif pada *Transformator*. Sementara *diverter switch* berupa rangkaian mekanis yang berfungsi untuk membuat kontak atau melepas kontak dalam waktu yang singkat. *Diverter switch*

ditempatkan di dalam *Tap Changer oil compartment*, yang merupakan tangki yang terisi oleh minyak isolasi sebagai isolator dan bahan pendingin.