

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Bagian ini memaparkan rangkuman beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan topik penelitian ini. Hasil-hasil penelitian sebelumnya digunakan sebagai dasar teori dan referensi pendukung dalam menganalisis permasalahan yang diangkat. Dengan meninjau berbagai temuan tersebut, peneliti dapat memperkuat landasan konseptual serta menegaskan posisi penelitian ini di antara studi-studi yang telah dilakukan sebelumnya. Beberapa hasil penelitian terdahulu yang dijadikan acuan yakni :

1. Menurut hasil penelitian yang dilakukan oleh Markus Dwiyanto dan Tobi Sogen dalam jurnal *Electro Luceat Vol. 4 No. 1 (2018)* yang berjudul “*Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Arus Netral dan Losses pada Transformator Distribusi di PT PLN Area Sorong*”, dijelaskan bahwa ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi tenaga listrik tiga fasa menyebabkan timbulnya arus pada penghantar netral trafo. Arus netral ini berkontribusi langsung terhadap rugi-rugi daya (losses) yang terjadi pada sistem, baik pada penghantar netral maupun arus yang mengalir ke tanah. Dalam penelitiannya, dilakukan perbandingan antara kondisi sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban. Hasilnya menunjukkan bahwa setelah penyeimbangan dilakukan, nilai arus netral yang mengalir melalui penghantar netral dan arus ke tanah mengalami penurunan signifikan, sehingga losses yang dihasilkan juga berkurang. Dengan kata lain, semakin tinggi tingkat ketidakseimbangan beban antar fasa, maka semakin besar arus netral yang timbul, yang pada akhirnya meningkatkan rugi-rugi daya dan menurunkan efisiensi transformator distribusi. Hal ini menunjukkan pentingnya upaya pemerataan beban untuk mengurangi losses yang diakibatkan oleh arus netral pada sistem distribusi listrik.

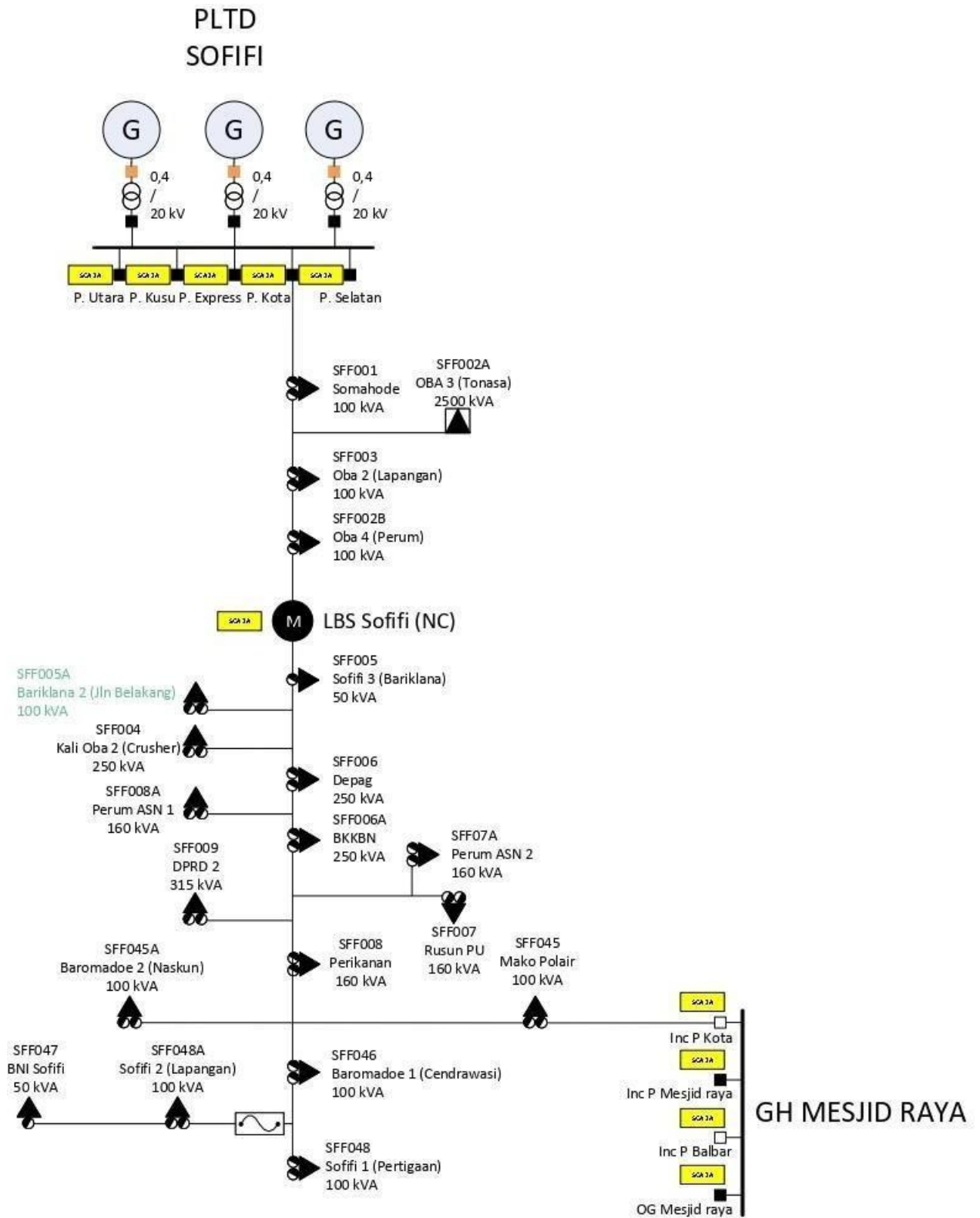
2. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh J. S. Setiadji dan rekan-rekannya dalam jurnal *“Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi”* (Neliticom, 2017), dijelaskan bahwa ketidakseimbangan beban merupakan penyebab utama munculnya arus netral yang signifikan pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat. Arus ini menimbulkan dua jenis rugi-rugi daya, yaitu losses pada penghantar netral trafo dan losses akibat arus netral yang mengalir ke tanah. Penelitian ini menemukan bahwa ketika ketidakseimbangan beban mencapai 28,67%, arus netral yang timbul dapat mencapai 118,6 ampere dengan rugi daya mencapai 8,62%. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa peningkatan ketidakseimbangan beban secara langsung berbanding lurus dengan kenaikan arus netral serta besarnya rugi-rugi daya yang terjadi. Oleh karena itu, pengendalian dan pemantauan beban antar fasa perlu dilakukan secara berkala untuk menjaga kestabilan sistem dan mengurangi kerugian energi.
3. Penelitian lain oleh Ahmad Deni Mulyadi dalam jurnal *Energi* yang berjudul *“Pengaruh Ketidakseimbangan Beban pada Rugi Daya Saluran Netral Jaringan Distribusi Tegangan Rendah”* (2019) juga menguatkan temuan tersebut. Dalam studinya, Mulyadi menjelaskan bahwa ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi menyebabkan munculnya arus pada penghantar netral yang menimbulkan rugi daya dalam bentuk panas akibat resistansi konduktor. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, ketika terjadi ketidakseimbangan beban sebesar 13,3%, arus netral yang mengalir tercatat sebesar 108 ampere dengan rugi daya sebesar 0,36%. Hal ini menunjukkan bahwa walaupun nilai ketidakseimbangan tidak terlalu besar, arus netral tetap memiliki dampak nyata terhadap efisiensi energi. Semakin besar arus netral yang mengalir melalui penghantar netral, semakin tinggi pula panas yang dihasilkan, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi transformator dan mempercepat degradasi material penghantar.
4. Hasil studi dari E. Julianto dan rekan-rekan dalam jurnal *“Studi Pengaruh Ketidakseimbangan Pembebanan Transformator Distribusi 20 kV PT PLN”* (2019) menegaskan bahwa arus netral merupakan salah satu indikator utama terjadinya rugi-

rugi daya pada sistem distribusi. Mereka menemukan bahwa dalam kondisi ketidakseimbangan yang cukup besar, arus netral meningkat tajam sehingga menimbulkan kenaikan rugi-rugi daya yang signifikan. Dalam perhitungan yang mereka lakukan, diperoleh bahwa peningkatan arus netral sejalan dengan meningkatnya total losses sistem akibat efek pemanasan pada penghantar netral. Dengan demikian, penelitian ini menunjukkan perlunya penerapan teknologi pemantauan berbasis digital untuk meminimalkan dampak arus netral terhadap efisiensi sistem distribusi tenaga listrik.

5. Sementara itu, R. Afrianda dan rekan-rekan dalam *Jurnal SUTET IT PLN (2021)* berjudul “*Akibat Ketidakseimbangan Beban dan Losses pada Transformator Distribusi*” menjelaskan secara matematis hubungan antara arus netral dan rugi daya pada penghantar netral dengan persamaan $P_N = I_N^2 \times R$, di mana I_N adalah arus netral dan R merupakan tahanan penghantar netral. Persamaan ini menunjukkan bahwa rugi-rugi daya akan meningkat secara kuadrat terhadap kenaikan arus netral. Afrianda menegaskan bahwa dalam sistem distribusi yang beban antar fasanya tidak seimbang, peningkatan arus netral dapat menyebabkan kenaikan suhu pada penghantar netral hingga melampaui batas aman, yang berdampak pada penurunan umur pakai transformator serta peningkatan biaya operasional.
6. Penelitian yang dilakukan oleh Kurniawan (2021) dalam jurnal *TELKA: Jurnal Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi, dan Kontrol* menyoroti pentingnya pemanfaatan teknologi pemantauan seperti SIMANTRA untuk menganalisis arus netral dan rugi-rugi daya secara real-time. Menurutny, penggunaan aplikasi digital semacam ini memungkinkan operator untuk mengidentifikasi ketidakseimbangan beban dengan cepat dan melakukan tindakan korektif secara langsung. Dari hasil pengamatan di lapangan, sistem pemantauan berbasis SIMANTRA mampu menurunkan rugi daya hingga 15% melalui deteksi dini arus netral yang melebihi ambang batas.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Sistem Tenaga Listrik



Gambar 2.1 Single Line Diagram ULP Sofifi Feeder Kota

Sistem tenaga listrik adalah jaringan yang saling terhubung yang mencakup proses pembangkitan, transmisi, dan distribusi listrik untuk memastikan bahwa daya dapat disalurkan secara andal, efisien, dan aman dari pembangkit listrik ke konsumen. Pada tahap pembangkitan, listrik dihasilkan dari berbagai sumber seperti pembangkit listrik tenaga batu bara, pembangkit listrik tenaga air, pembangkit listrik tenaga gas, pembangkit listrik tenaga surya, dan pembangkit listrik tenaga biomassa. Tegangan kemudian dinaikkan menggunakan transformator sehingga dapat ditransmisikan jarak jauh dengan kehilangan daya minimal. Listrik ini dialirkan melalui jaringan transmisi tegangan tinggi hingga mencapai gardu induk, di mana tegangannya diturunkan kembali untuk didistribusikan ke jaringan distribusi. Jaringan distribusi mengantarkan listrik ke pelanggan pada tegangan menengah dan rendah menggunakan peralatan seperti tiang listrik, konduktor, isolator, transformator distribusi, dan sistem keselamatan seperti perangkat proteksi dan sistem pentanahan yang membantu menjaga keandalan dan keamanan jaringan. Secara keseluruhan, sistem tenaga listrik harus dirancang dengan mempertimbangkan kualitas tegangan, efisiensi, pasokan daya yang berkelanjutan, dan kemampuan untuk menangani berbagai gangguan, sehingga listrik dapat tersedia secara konsisten dan tepat bagi masyarakat.

2.2.2. Gardu Distribusi Tenaga Listrik

Gardu distribusi tenaga listrik pada dasarnya merupakan fasilitas atau instalasi yang berfungsi sebagai penghubung antara sistem penyaluran tenaga listrik dengan konsumen. Di dalam gardu distribusi terdapat beberapa peralatan utama, antara lain Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB-TM), transformator distribusi, serta Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR). Peralatan-peralatan tersebut bekerja secara terpadu untuk menurunkan tegangan menengah, umumnya sebesar 20 kV, menjadi tegangan rendah 220/380 V sebelum disalurkan kepada pelanggan, baik pelanggan tegangan menengah maupun tegangan rendah.

Perancangan dan konstruksi gardu distribusi dilakukan dengan mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomis guna mencapai efisiensi biaya tanpa mengurangi keandalan sistem. Selain itu, desain gardu distribusi juga harus menyesuaikan dengan kondisi lingkungan sekitar serta mematuhi ketentuan dan peraturan yang ditetapkan oleh pemerintah daerah setempat, sehingga keberadaannya tidak mengganggu tata ruang dan keselamatan masyarakat.

2.2.3. Peranan Strategis Gardu Distribusi

Secara teknis, gardu distribusi dapat didefinisikan sebagai instalasi tenaga listrik yang berfungsi menurunkan tegangan dari jaringan distribusi tegangan menengah (TM) menjadi tegangan rendah (TR) dan mendistribusikannya kepada pelanggan. Gardu distribusi biasanya terdiri atas:

1. Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB-TM),
2. Transformator Distribusi,
3. Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR),
4. Sistem proteksi,
5. Sistem pembumian (grounding system).

Dalam sistem distribusi 20 kV milik PT PLN (Persero), gardu distribusi menjadi penghubung antara jaringan SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah) atau SKTM (Saluran Kabel Tegangan Menengah) dengan jaringan SUTR (Saluran Udara Tegangan Rendah) atau SKTR (Saluran Kabel Tegangan Rendah).

Dengan kata lain, gardu distribusi merupakan titik konversi energi listrik terakhir sebelum energi tersebut dimanfaatkan secara langsung oleh pelanggan.

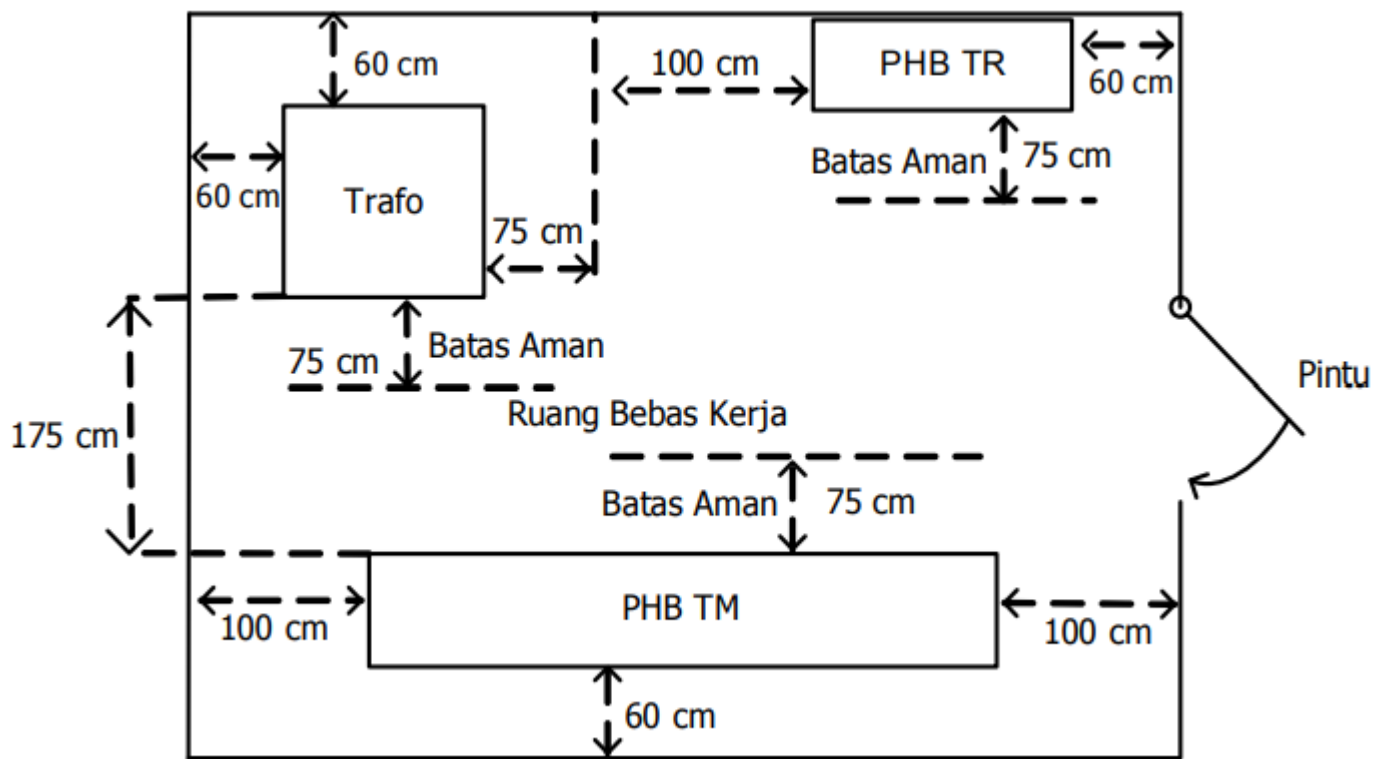
2.3. Jenis – Jenis Gardu Distribusi

2.3.1. Gardu Distribusi Tipe Beton



Gambar 2.2 Gardu Beton

Gardu tipe beton merupakan gardu permanen yang seluruh peralatan listriknya ditempatkan di dalam bangunan berbahan beton atau konstruksi sipil sejenis. Model ini dirancang untuk memberikan perlindungan maksimal terhadap gangguan cuaca, vandalisme, maupun risiko keselamatan. Umumnya digunakan pada daerah dengan kebutuhan daya cukup besar dan lokasi tetap (fixed installation).



Gambar 2.3 *lay out* Perlengkapan Gardu Distribusi Beton.

Komponen utama:

1. Transformator distribusi
2. Panel hubung bagi tegangan menengah (incoming–outgoing cubicle)
3. Panel hubung bagi tegangan rendah (PHB-TR)
4. Sistem proteksi (arrestor dan fuse)
5. Rel/busbar
6. Sistem pentanahan

2.3.2. Gardu Distribusi Tipe Kios (Metal Enclosure)

Gardu kios adalah gardu dengan konstruksi berbahan logam atau baja ringan yang seluruh peralatannya terintegrasi dalam satu unit tertutup. Desainnya lebih ringkas dibanding gardu beton dan pemasangannya relatif cepat. Tipe ini sering digunakan untuk kebutuhan sementara atau lokasi dengan keterbatasan ruang.

Sumber : <https://id.made-in-china.com>

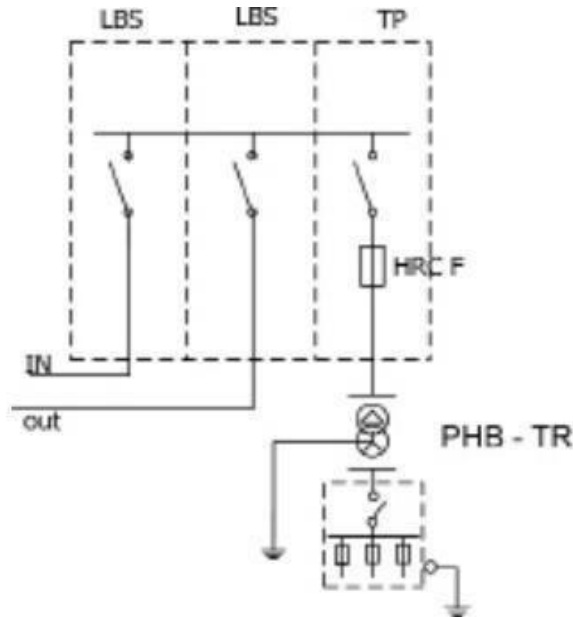


Gambar 2.4 Gardu kios

Komponen utama:

1. Transformator distribusi
2. Panel tegangan menengah
3. Panel distribusi tegangan rendah
4. Peralatan pengaman (Lightning Arrester dan Fuse Cut Out)
5. Busbar dan sistem kabel penghubung

2.3.3. Gardu Portal



Gambar 2.5 Bagan satu garis

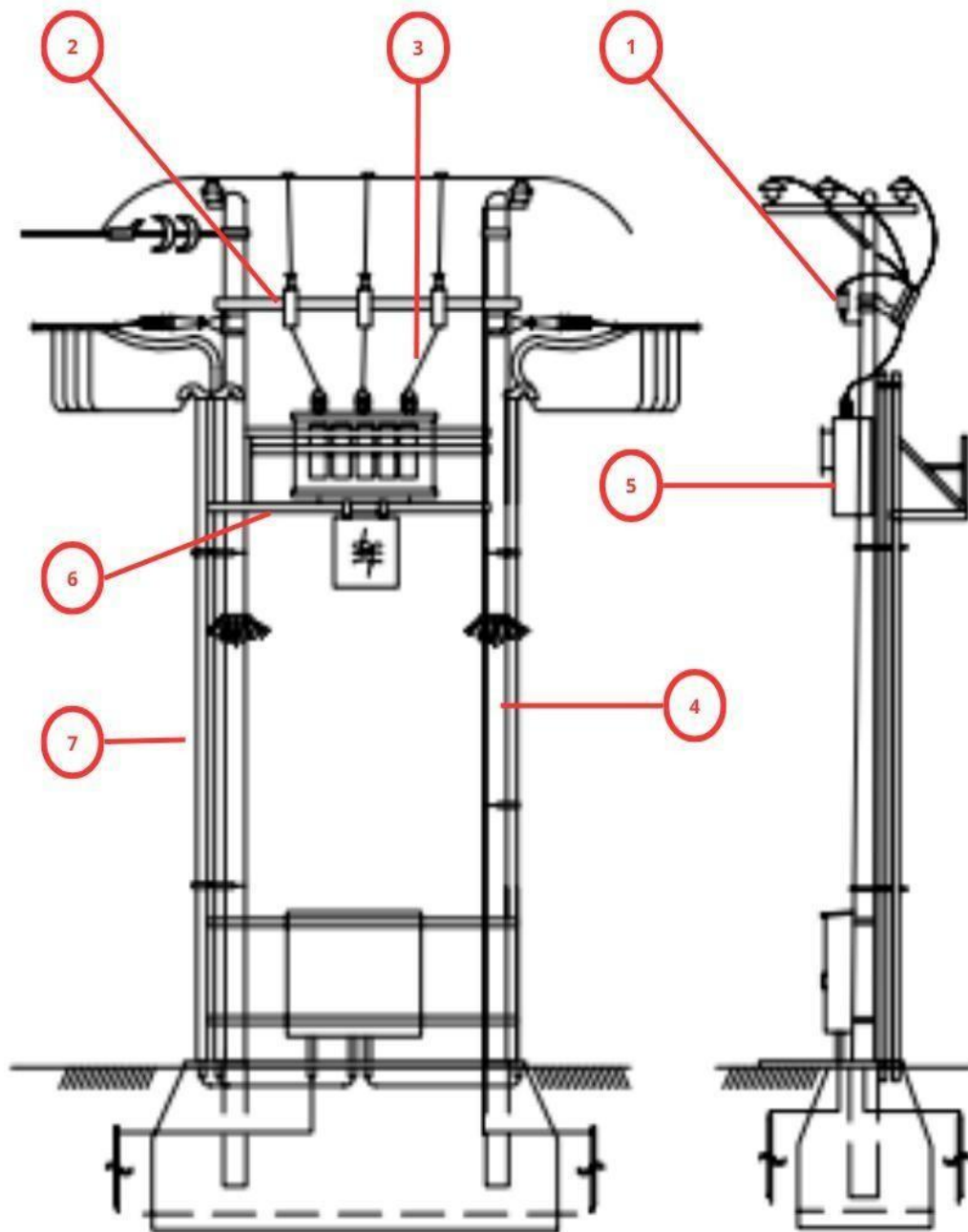
Gardu portal merupakan salah satu jenis gardu distribusi pasangan luar (*outdoor distribution substation*) yang menggunakan dua tiang atau lebih sebagai struktur utama penyangga transformator dan perlengkapan lainnya. Gardu ini dinamakan “portal” karena konstruksinya menyerupai bentuk portal, yaitu dua tiang vertikal yang dihubungkan oleh rangka horizontal sebagai dudukan transformator.

Gardu portal digunakan sebagai titik transformasi tegangan dari jaringan tegangan menengah (20 kV) ke jaringan tegangan rendah (380/220 V) pada sistem distribusi tenaga listrik. Jenis gardu ini banyak digunakan pada wilayah dengan tingkat beban menengah hingga besar, seperti kawasan permukiman padat, pertokoan, fasilitas umum, maupun industri kecil.

Secara umum, gardu portal dirancang untuk kapasitas transformator antara 100 kVA hingga 400 kVA, meskipun dalam praktik dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem distribusi setempat.

Komponen Utama Gardu Portal

Komponen utama bagian atas Gardu :



Gambar 2.6 Konstruksi Gardu Portal

1. Lightning Arrester (LA)

Sumber : <https://powerindoperkasa.com/product/arrester//>



Gambar 2.7 Lightning Arrester Polimer

Lightning Arrester (LA) adalah peralatan proteksi pada sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk melindungi peralatan seperti transformator, gardu distribusi, dan jaringan listrik dari gangguan tegangan lebih (overvoltage) akibat sambaran petir maupun surja hubung (switching surge). Secara prinsip, Lightning Arrester bekerja berdasarkan karakteristik non-linear dari elemen varistor berbahan Zinc Oxide (ZnO), di mana dalam kondisi tegangan normal alat ini bersifat sebagai isolator dengan resistansi sangat tinggi

sehingga tidak mengalirkan arus ke tanah, namun ketika terjadi lonjakan tegangan yang melebihi batas kerja sistem, resistansinya turun secara drastis sehingga berubah menjadi konduktor dan mengalirkan arus surja tersebut ke sistem pembumian. Setelah tegangan kembali normal, Lightning Arrester kembali ke kondisi isolatif, sehingga peralatan yang dilindungi tidak menerima tegangan lebih yang dapat merusak isolasi atau menyebabkan kegagalan sistem.

1. Fuse Cut Out

Sumber : <https://powerindoperkasa.com/product/fuse-cut-out/>

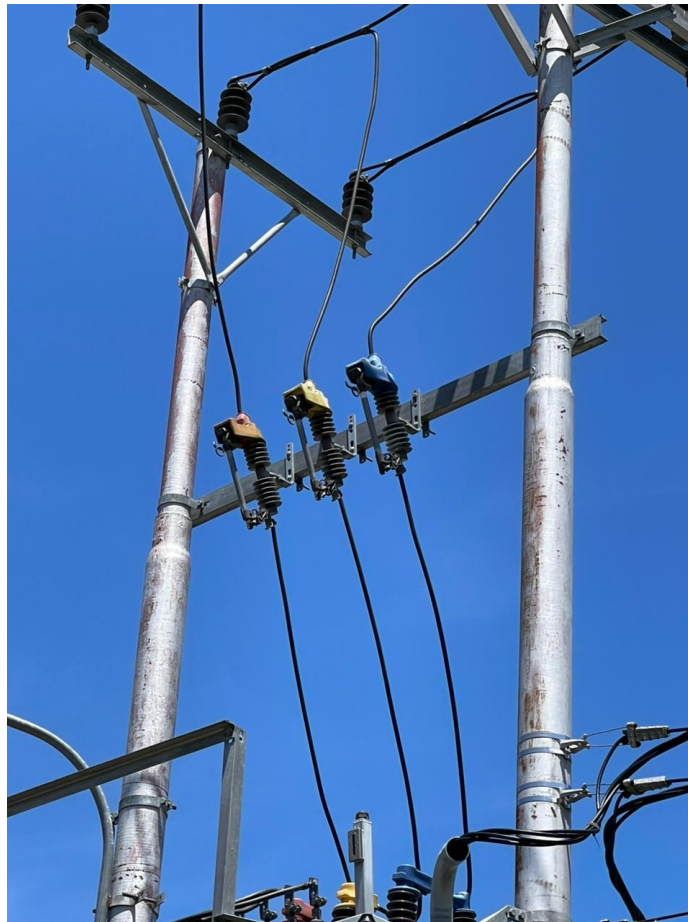


Gambar 2.8 Fuse Cut Out (FCO)

Fuse Cut Out (FCO) adalah peralatan proteksi pada sistem distribusi tenaga listrik

yang berfungsi sebagai pengaman arus lebih dan hubung singkat pada sisi tegangan menengah, khususnya pada gardu distribusi tipe portal maupun cantol. FCO umumnya dipasang pada sisi primer transformator distribusi dan terdiri atas tabung fuse (fuse link) yang dapat meleleh apabila arus yang mengalir melebihi batas nominalnya. Konsep kerja Fuse Cut Out didasarkan pada prinsip pemutusan rangkaian secara otomatis melalui elemen lebur; dalam kondisi normal FCO menghantarkan arus seperti konduktor biasa, namun ketika terjadi gangguan seperti hubung singkat atau beban lebih yang menyebabkan arus melonjak, elemen fuse akan panas dan meleleh sehingga rangkaian terputus dan transformator terlindungi dari kerusakan yang lebih parah.

2. Wiring gardu atau Pengawatan Gardu



Gambar 2.9 Wiring gardu

Wiring gardu atau Pengawatan Gardu adalah kawat penghubung untuk

menghubungkan tegangan dari SUTM, Lighting Arrester, dan Fuse Cut Out ke Trafo Distribusi

3. Tiang



Gambar 2.10 Tiang Listrik milik PLN

Tiang yang digunakan pada Gardu distribusi pada konstruksi gardu portal biasanya berupa Besi maupun beton, yang memiliki panjang 11 atau 12 meter.

4. Trafo Distribusi

Sumber : <http://id.scotech-electrical.com/>



Gambar 2.11 Transformator Step Down

Transformator distribusi (trafo distribusi) adalah peralatan listrik statis yang berfungsi menurunkan tegangan dari jaringan distribusi tegangan menengah (umumnya 20 kV) menjadi tegangan rendah (380/220 V) agar dapat digunakan oleh pelanggan rumah

tangga, komersial, maupun industri kecil. Trafo distribusi bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, di mana arus bolak-balik yang mengalir pada kumparan primer akan menghasilkan fluks magnet di dalam inti besi, kemudian fluks tersebut menginduksi tegangan pada kumparan sekunder sesuai dengan perbandingan jumlah lilitan antara sisi primer dan sekunder. Dalam kondisi operasi normal, energi listrik ditransfer tanpa adanya hubungan listrik langsung antara kedua kumparan, sehingga memberikan isolasi listrik sekaligus efisiensi penyaluran daya. Pada sistem tiga fasa empat kawat, trafo distribusi biasanya memiliki titik netral pada sisi sekunder untuk melayani beban satu fasa, sehingga keseimbangan pembebanan antar fasa sangat penting guna mencegah timbulnya arus netral berlebih dan rugi daya (losses) yang dapat menurunkan efisiensi serta umur pakai transformator.

5. Rangka Trafo Distribusi



Gambar 2.12 Transformator Step Down

Rangka trafo distribusi adalah struktur penopang mekanis yang berfungsi untuk menopang dan mengamankan transformator distribusi beserta perlengkapan pendukungnya pada gardu, khususnya pada gardu tipe portal dan cantol. Rangka ini umumnya terbuat dari baja galvanis atau konstruksi logam yang memiliki kekuatan mekanis tinggi serta tahan terhadap beban berat, getaran, dan pengaruh lingkungan seperti angin dan korosi. Konsep kerja rangka trafo distribusi bukan sebagai penghantar listrik, melainkan sebagai sistem struktur penyangga yang memastikan transformator terpasang dengan stabil, memiliki jarak aman terhadap tanah dan peralatan lain, serta mampu menahan gaya mekanis akibat berat trafo dan tarikan konduktor.

6. Pipa Jurusan

Sumber : <https://luigielectric.web.indotrading.com/>

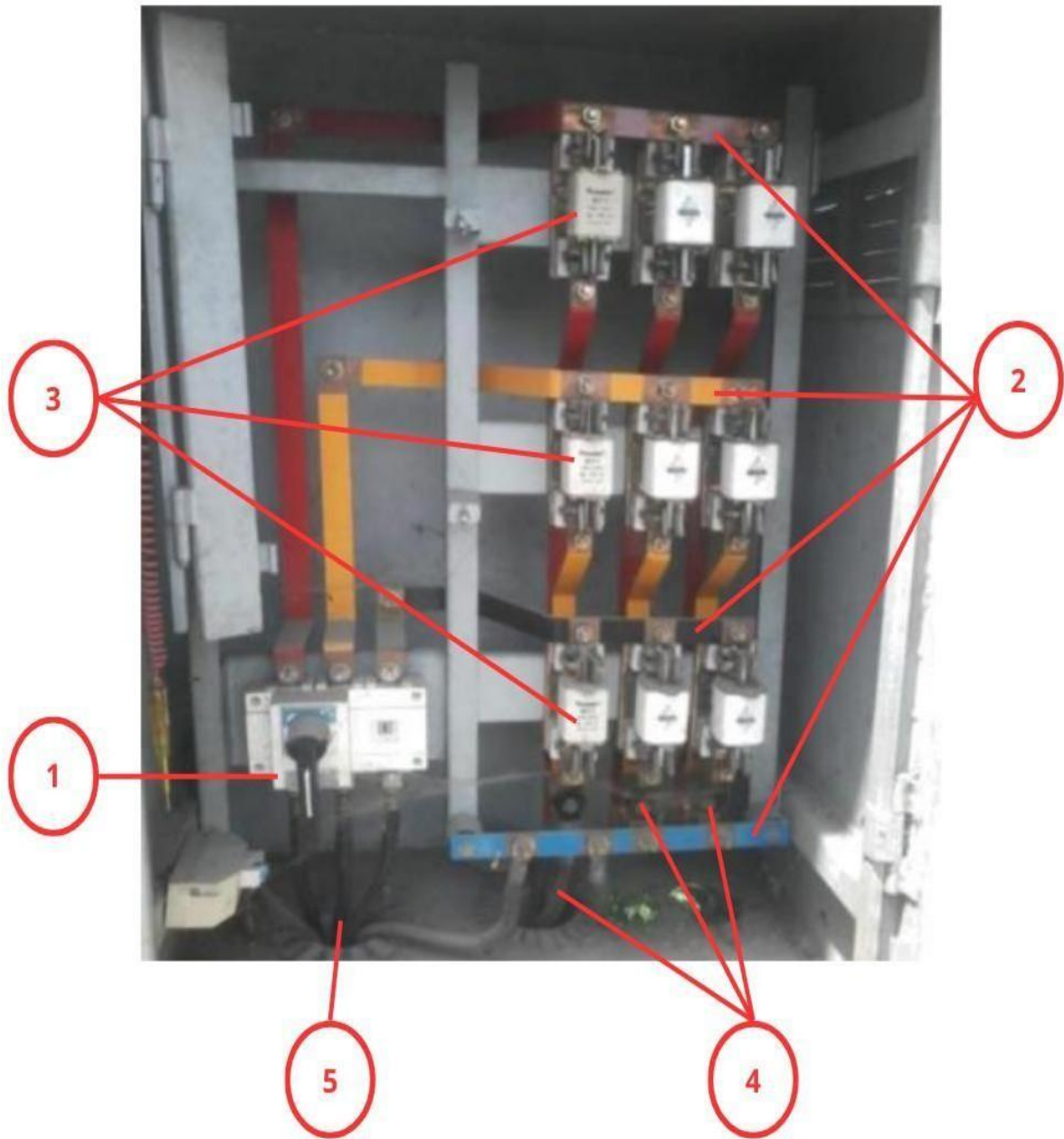


Gambar 2.13 Pipa Galvanis

Pipa jurusan gardu distribusi adalah komponen pelindung mekanis berupa pipa baja galvanis atau PVC khusus yang digunakan sebagai jalur keluar masuk kabel jurusan dari

panel PHB-TR menuju jaringan tegangan rendah (SUTR atau SKTR). Pipa ini berfungsi melindungi kabel dari gangguan eksternal seperti benturan, gesekan, kelembapan, paparan sinar matahari, serta potensi gangguan hewan atau vandalisme, sehingga keamanan dan keandalan penyaluran daya tetap terjaga.

Komponen utama bagian bawah Gardu :

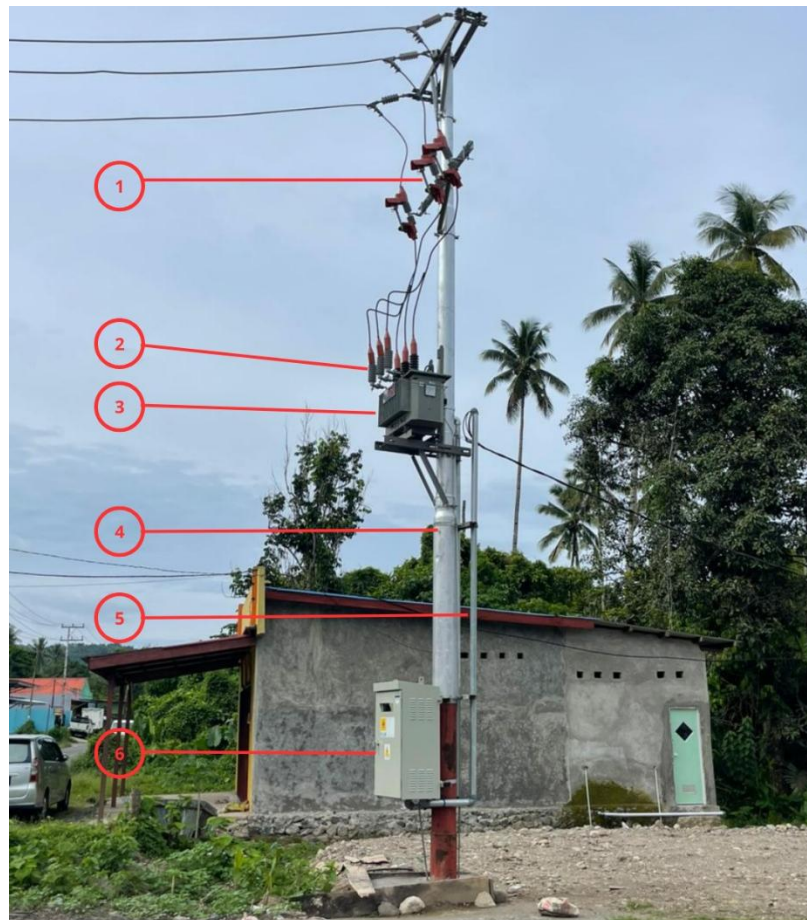


Gambar 2.14 Panel Hubung Bagi Tegangan Rendah

1. Saklar Utama
2. Rel Jurusan
3. NH-Fuse Jurusan
4. Kabel Jurusan (NYY atau NYFGBY)
5. Kabel penghubung Trafo ke PHB-TR

2.3.4. Gardu Distribusi Tipe Cantol (Pole Mounted)

Gardu cantol merupakan gardu yang seluruh perlengkapannya dipasang pada satu tiang dengan kekuatan mekanis tertentu. Biasanya digunakan untuk kapasitas kecil dan melayani beban terbatas, seperti di daerah perumahan atau pedesaan. Konstruksinya sederhana dan ekonomis.



Gambar 2.15 Konstruksi Gardu Cantol

Gardu cantol merupakan gardu yang seluruh perlengkapannya dipasang pada satu tiang dengan kekuatan mekanis tertentu. Biasanya digunakan untuk kapasitas kecil dan melayani beban terbatas, seperti di daerah perumahan atau pedesaan. Konstruksinya sederhana dan ekonomis.

Komponen Utama Gardu Cantol

Komponen utama bagian atas Gardu :

1. Fuse Cut Out

Sumber : <https://powerindoperkasa.com/product/fuse-cut-out/>



Gambar 2.16 Fuse Cut Out (FCO)

Fuse Cut Out (FCO) adalah peralatan proteksi pada sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi sebagai pengaman arus lebih dan hubung singkat pada sisi tegangan menengah, khususnya pada gardu distribusi tipe portal maupun cantol. FCO umumnya dipasang pada sisi primer transformator distribusi dan terdiri atas tabung fuse (fuse link) yang dapat meleleh apabila arus yang mengalir melebihi batas nominalnya. Konsep kerja Fuse Cut Out didasarkan pada prinsip pemutusan rangkaian secara otomatis melalui elemen lebur; dalam kondisi normal FCO menghantarkan arus seperti konduktor biasa, namun ketika terjadi gangguan seperti hubung singkat atau beban lebih yang menyebabkan arus melonjak, elemen fuse akan panas dan meleleh sehingga rangkaian terputus dan transformator terlindungi dari kerusakan yang lebih parah.

2. . Lightning Arrester (LA)

Sumber : <https://powerindoperkasa.com/product/arrester//>



Gambar 2.17 Lightning Arrester (LA)

Lightning Arrester (LA) adalah peralatan proteksi pada sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk melindungi peralatan seperti transformator, gardu distribusi, dan jaringan listrik dari gangguan tegangan lebih (overvoltage) akibat sambaran petir maupun surja hubung (switching surge). Secara prinsip, Lightning Arrester bekerja berdasarkan karakteristik non-linear dari elemen varistor berbahan Zinc Oxide (ZnO), di mana dalam kondisi tegangan normal alat ini bersifat sebagai isolator dengan resistansi sangat tinggi sehingga tidak mengalirkan arus ke tanah, namun ketika terjadi lonjakan tegangan yang melebihi batas kerja sistem, resistansinya turun secara drastis sehingga berubah menjadi konduktor dan mengalirkan arus surja tersebut ke sistem pembumian. Setelah tegangan kembali normal, Lightning Arrester kembali ke kondisi isolatif, sehingga peralatan yang dilindungi tidak menerima tegangan lebih yang dapat merusak isolasi atau menyebabkan kegagalan sistem.

3. Trafo Distribusi

Sumber : <http://id.scotech-electrical.com/>



Gambar 2.18 Trafo Step Down

Transformator distribusi (trafo distribusi) adalah peralatan listrik statis yang berfungsi menurunkan tegangan dari jaringan distribusi tegangan menengah (umumnya 20

kV) menjadi tegangan rendah (380/220 V) agar dapat digunakan oleh pelanggan rumah tangga, komersial, maupun industri kecil. Trafo distribusi bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, di mana arus bolak-balik yang mengalir pada kumparan primer akan menghasilkan fluks magnet di dalam inti besi, kemudian fluks tersebut menginduksi tegangan pada kumparan sekunder sesuai dengan perbandingan jumlah lilitan antara sisi primer dan sekunder. Dalam kondisi operasi normal, energi listrik ditransfer tanpa adanya hubungan listrik langsung antara kedua kumparan, sehingga memberikan isolasi listrik sekaligus efisiensi penyaluran daya. Pada sistem tiga fasa empat kawat, trafo distribusi biasanya memiliki titik netral pada sisi sekunder untuk melayani beban satu fasa, sehingga keseimbangan pembebanan antar fasa sangat penting guna mencegah timbulnya arus netral berlebih dan rugi daya (losses) yang dapat menurunkan efisiensi serta umur pakai transformator.

4. Tiang



Gambar 2.19 Tiang

Tiang yang digunakan pada Gardu distribusi pada konstruksi gardu portal biasanya berupa Besi maupun beton, yang memiliki panjang 11 atau 12 meter.

5. Pipa Jurusan

Sumber : <https://luigielectric.web.indotrading.com/>



Gambar 2.20 Pipa Galvanis

jurusan gardu distribusi adalah komponen pelindung mekanis berupa pipa baja galvanis atau PVC khusus yang digunakan sebagai jalur keluar masuk kabel jurusan dari panel PHB-TR menuju jaringan tegangan rendah (SUTR atau SKTR). Pipa ini berfungsi melindungi kabel dari gangguan eksternal seperti benturan, gesekan, kelembapan, paparan sinar matahari, serta potensi gangguan hewan atau vandalisme, sehingga keamanan dan keandalan penyaluran daya tetap terjaga.

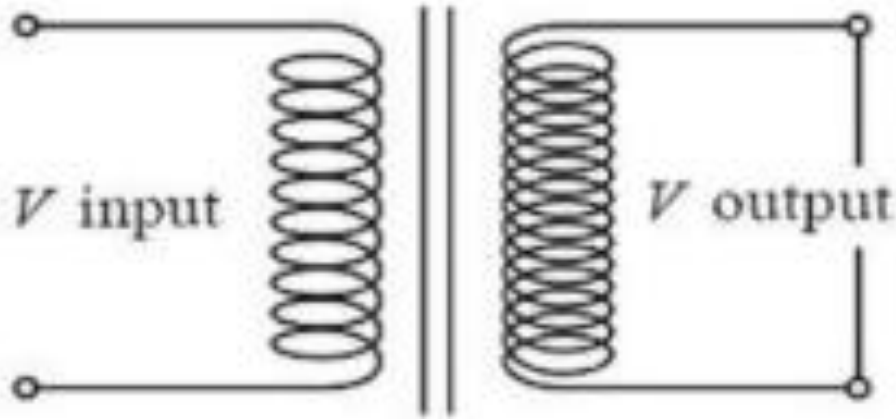
6. PHB-TR

adalah panel atau peralatan listrik yang berfungsi untuk membagi, mengendalikan, dan melindungi penyaluran tenaga listrik pada sisi tegangan rendah (220/380 volt) setelah diturunkan oleh transformator distribusi. PHB-TR biasanya terpasang di dalam gardu distribusi dan menjadi titik pembagian daya dari trafo ke beberapa jurusan atau pelanggan. Di dalamnya terdapat komponen seperti saklar utama, pemutus tenaga, sekring (NH-fuse), rel tembaga (busbar), serta alat ukur seperti amperemeter atau kWh meter gardu. Secara sederhana, PHB-TR berfungsi sebagai pusat distribusi dan pengamanan daya listrik pada sisi tegangan rendah sebelum disalurkan ke jaringan pelanggan.



Gambar 2.21 Panel Hubung Bagi Tegangan Rendah Gardu Cantol

2.3.5. Transformator



Gambar 2.22 Diagram Prinsip Kerja Transformator

Transformator distribusi adalah alat listrik yang digunakan untuk mengubah tingkat tegangan listrik dalam sistem tenaga listrik dengan cara memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik. Transformator bekerja dengan meneruskan energi listrik dari suatu rangkaian ke rangkaian lain tanpa terjadi hubungan langsung secara listrik. Dalam sistem kelistrikan, energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit umumnya memiliki tegangan antara 6 kV hingga 20 kV. Tegangan tersebut kemudian dikumpulkan agar dapat didistribusikan melalui jaringan transmisi jarak jauh dengan efisiensi yang lebih baik. Dengan meningkatnya tegangan, arus yang mengalir pada penghantar akan berkurang sehingga kerugian energi pada jaringan transmisi dapat diminimalkan. Dalam sistem pasokan listrik di Indonesia, tegangan pengiriman yang digunakan oleh PLN biasanya berada dalam rentang 70 kV, 150 kV, hingga 500 kV. Tegangan yang tinggi ini digunakan untuk mengirimkan energi listrik dari pusat pembangkit ke gardu induk yang letaknya dekat dengan area yang membutuhkan beban energi. Setelah energi listrik sampai di gardu induk, tegangan listrik tersebut kemudian diturunkan menggunakan transformator menjadi tegangan menengah sekitar 20 kV. Tegangan menengah tersebut kemudian dialirkan melalui sistem distribusi hingga sampai ke gardu distribusi yang berada di dekat tempat tinggal pelanggan. Di gardu distribusi, tegangan menengah sebesar 20 kV akan diturunkan kembali melalui transformator distribusi menjadi tegangan rendah sebesar 380 volt untuk sistem tiga fasa dan

220 volt untuk sistem satu fasa. Tegangan yang rendah tersebut kemudian dialirkan ke rumah - rumah , kantor, serta usaha kecil. Oleh karena itu, transformator distribusi listrik memainkan peran yang sangat penting dalam memastikan tegangan yang diterima oleh pelanggan sesuai dengan standar keamanan yang digunakan oleh peralatan listrik.

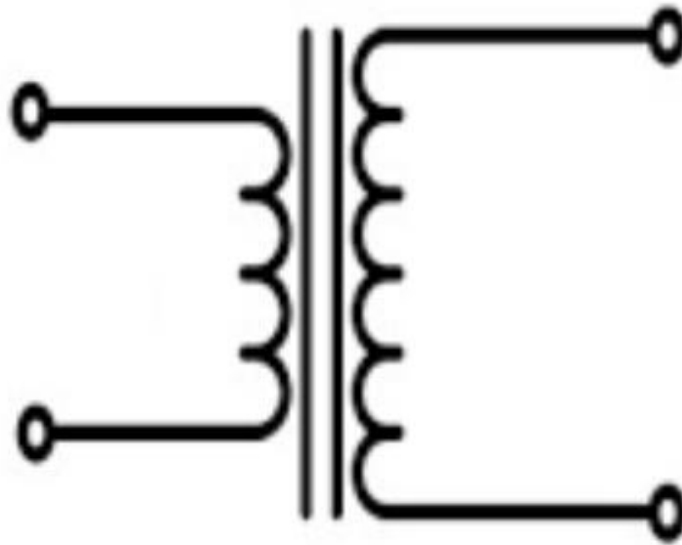
1. Trafo *Step Up*



Gambar 2.23 Trafo *Step Up*

Transformator step-up adalah transformator yang digunakan untuk menaikkan tegangan listrik dari sisi primer ke sisi sekunder. Pada transformator ini jumlah lilitan

kumparan sekunder lebih banyak dibandingkan kumparan primer sehingga tegangan keluaran menjadi lebih besar. Ketika tegangan dinaikkan oleh transformator, arus listrik pada sisi sekunder akan menurun. Hal ini terjadi karena transformator tidak menghasilkan daya baru, melainkan hanya mengubah perbandingan antara tegangan dan arus sehingga daya total tetap relatif sama.



Gambar 2.24 Diagram Trafo *Step Up*

Sebagai contoh, jika sebuah transformator memiliki perbandingan lilitan **10 : 1**, maka tegangan dapat berubah dengan rasio yang sama. Misalnya tegangan 10 volt pada sisi primer dapat menjadi 100 volt pada sisi sekunder, sementara arusnya berubah berlawanan arah dengan rasio tersebut. Transformator step-up banyak digunakan pada sistem pembangkit listrik untuk menaikkan tegangan sebelum listrik disalurkan melalui jaringan transmisi jarak jauh.

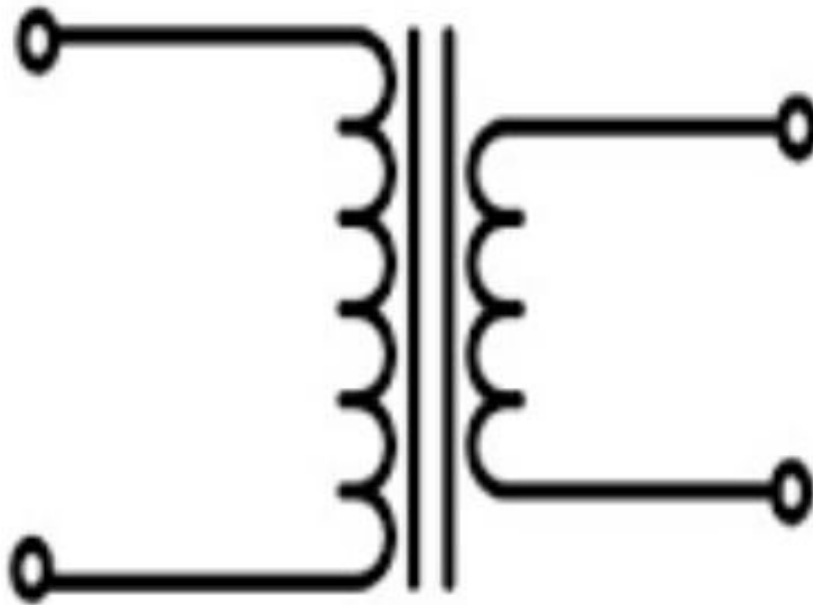
2. Trafo *Step Down*

Transformator *step-down* adalah transformator yang digunakan untuk menurunkan tegangan listrik dari sisi primer ke sisi sekunder. Pada transformator ini jumlah lilitan kumparan primer lebih banyak dibandingkan kumparan sekunder sehingga tegangan keluaran menjadi lebih kecil. Ketika tegangan diturunkan, arus listrik pada sisi sekunder

akan meningkat. Hal ini merupakan kebalikan dari transformator step-up, karena perubahan tegangan dan arus pada transformator selalu berbanding terbalik selama daya yang dipindahkan tetap sama.



Gambar 2.25 Trafo Step Down



Gambar 2.26 Diagram Trafo *Step Down*

Transformator step-down banyak digunakan pada sistem distribusi tenaga listrik maupun pada peralatan elektronik. Dalam sistem tenaga listrik, transformator ini digunakan untuk menurunkan tegangan tinggi dari jaringan transmisi menjadi tegangan yang lebih rendah agar aman digunakan oleh konsumen. Selain itu, transformator step-down juga sering digunakan pada adaptor listrik dan perangkat elektronik untuk menyesuaikan tegangan listrik dengan kebutuhan peralatan.

2.3.6. Sistem Monitoring Trafo (SIMANTRA)

Sistem tenaga listrik adalah jaringan yang saling terhubung yang mencakup proses pembangkitan, transmisi, dan distribusi listrik untuk memastikan bahwa daya dapat disalurkan secara andal, efisien, dan aman dari pembangkit listrik ke konsumen. Pada tahap pembangkitan, listrik dihasilkan dari berbagai sumber seperti pembangkit listrik tenaga batu bara, pembangkit listrik tenaga air, pembangkit listrik tenaga gas, pembangkit listrik tenaga

surya, dan pembangkit listrik tenaga biomassa. Tegangan kemudian dinaikkan menggunakan transformator sehingga dapat ditransmisikan jarak jauh dengan kehilangan daya minimal. Listrik ini dialirkan melalui jaringan transmisi tegangan tinggi hingga mencapai gardu induk, di mana tegangannya diturunkan kembali untuk didistribusikan ke jaringan distribusi. Jaringan distribusi mengantarkan listrik ke pelanggan pada tegangan menengah dan rendah menggunakan peralatan seperti tiang listrik, konduktor, isolator, transformator distribusi, dan sistem keselamatan seperti perangkat proteksi dan sistem pentanahan yang membantu menjaga keandalan dan keamanan jaringan. Secara keseluruhan, sistem tenaga listrik harus dirancang dengan mempertimbangkan kualitas tegangan, efisiensi, pasokan daya yang berkelanjutan, dan kemampuan untuk menangani berbagai gangguan, sehingga listrik dapat tersedia secara konsisten dan tepat bagi masyarakat.

Sistem Monitoring Trafo (Simantra) merupakan inovasi berbasis teknologi informasi yang dikembangkan oleh PT PLN (Persero) untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan pengelolaan aset distribusi tenaga listrik. Aplikasi ini berfungsi sebagai sistem pengumpulan, penyimpanan, serta analisis data gardu distribusi secara real-time.

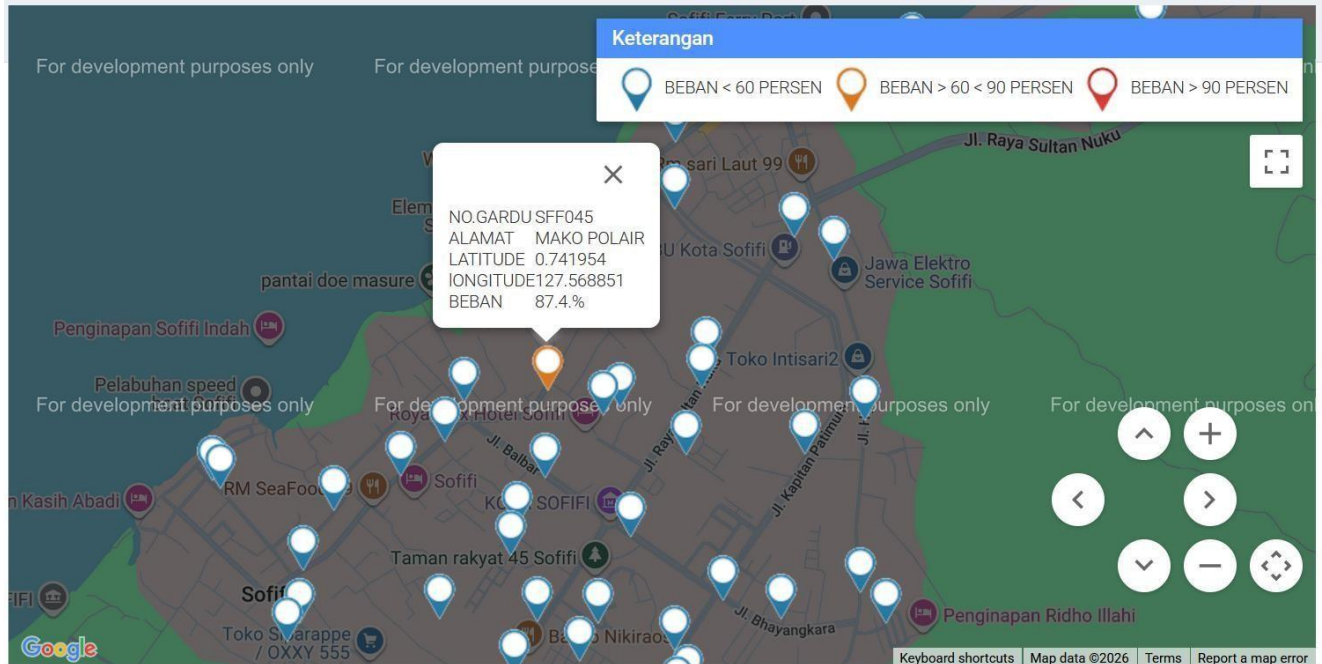
Simantra mempermudah pemantauan ribuan transformator distribusi dengan data yang terpusat dan mudah diakses oleh berbagai level organisasi, mulai dari Unit Induk Wilayah (UIW), Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan (UP3), hingga Unit Layanan Pelanggan (ULP).

Informasi yang dikelola meliputi nameplate trafo, hasil pengukuran beban, tegangan pangkal dan ujung, riwayat gangguan, serta kegiatan pemeliharaan. Selain itu, Simantra juga dilengkapi fitur post-analysis yang menganalisis beban lebih (overload), ketidakseimbangan fasa, dan anomali tegangan. Dengan kemampuan tersebut, Simantra mendukung pengambilan keputusan berbasis data dan menjadi komponen penting dalam sistem manajemen aset distribusi PLN

Melalui fitur post analysis, Simantra memungkinkan pengguna untuk melakukan analisis terhadap hasil pengukuran beban trafo sehingga dapat diketahui kondisi operasional trafo secara akurat. Sistem ini dapat diakses melalui jaringan web pada alamat

<http://103.94.5.58/mantra/index> dan menjadi alat bantu penting dalam sistem manajemen aset kelistrikan.

2.3.7. Aset Gardu Distribusi dan Peranannya Dalam Keandalan Sistem



Gambar 2.27 Peta Lokasi Gardu Distribusi Di ULP Sofifi

Gardu distribusi berfungsi menurunkan tegangan dari jaringan menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah (220/380 V) yang digunakan oleh pelanggan. Transformator distribusi yang menjadi inti dari gardu berperan menjaga kestabilan suplai daya listrik ke pelanggan.

Kinerja gardu sangat berpengaruh terhadap indeks keandalan sistem, yaitu SAIDI (System Average Interruption Duration Index) dan SAIFI (System Average Interruption Frequency Index). Ketidakseimbangan beban, gangguan mekanis, serta kondisi lingkungan yang ekstrem dapat meningkatkan nilai SAIDI dan SAIFI. Sistem Simantra membantu PLN memantau kondisi tersebut secara menyeluruh dan memberikan data pendukung untuk tindakan preventif terhadap gangguan distribusi.

2.3.8. Tujuan Pengembangan SIMANTRA

Tujuan utama pengembangan Simantra adalah menunjang program “Sempurna Kelola Gardu” sebagai upaya PLN untuk mencapai Zero Gangguan Trafo.

Secara khusus, SIMANTRA bertujuan untuk:

1. Meningkatkan efisiensi pengawasan aset distribusi.
2. Menyediakan basis data terpusat dan terintegrasi.
3. Mempercepat pengambilan keputusan berbasis analisis data lapangan.
4. Meningkatkan keandalan pasokan listrik melalui deteksi dini potensi gangguan.
5. Mewujudkan transformasi digital dalam manajemen aset kelistrikan.
6. Dengan adanya Simantra, seluruh kegiatan pengukuran, analisis, dan evaluasi beban trafo dilakukan secara sistematis dan terdokumentasi dengan baik.

2.3.9. Fitur-Fitur Utama SIMANTRA

Simantra memiliki tujuh fitur utama yang saling terintegrasi, yaitu:

1. Halaman Akses (Login) – otorisasi pengguna sesuai peran organisasi.
2. Dashboard – menampilkan indikator beban trafo, status pengukuran, dan kapasitas terpasang.
3. Peta Gardu – menampilkan lokasi gardu berdasarkan warna tingkat pembebanan (biru <60%, jingga 60–90%, merah >90%).
4. Master Data – memuat data dasar gardu, penyulang, serta karakteristik trafo.
5. Proses Data – mencakup pengukuran beban, gangguan, pemeliharaan, serta penggantian trafo.
6. Informasi – menampilkan hasil pengukuran dan histori beban.
7. Laporan – menyediakan laporan analisis seperti beban *overload*, derating, ketidakseimbangan, dan tegangan ujung rendah.

Fitur-fitur ini menjadikan Simantra tidak hanya sebagai alat pelaporan, tetapi juga sebagai sistem analitik yang mendukung peningkatan keandalan distribusi listrik.

2.3.10. Ketidakseimbangan Beban Gardu pada Aplikasi SIMANTRA

DAYA	BEBAN		ARUS BEBAN				TEGANGAN			KETIDAKSEIMBANGAN
	kVA	PERSEN	R-TOTAL	S-TOTAL	T-TOTAL	N-TOTAL	R-N	S-N	T-N	
00	63.52	63.52	104.7	61.6	112.1	61.2	227.9	229.3	227.3	22.41
00	31.47	31.47	73.5	30.07	33.75	40.9	228.1	230.2	229.3	40.38
30	37.09	14.84	73	30.69	58.6	35.25	228	229	228.6	28.85

Gambar 2.28 Daftar Gardu Tidak Seimabang Di Aplikasi SIMANTRA

Ketidakseimbangan beban gardu merupakan salah satu kondisi yang sering terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik, khususnya pada gardu distribusi yang menggunakan sistem tiga fasa. Ketidakseimbangan beban terjadi ketika arus atau daya yang mengalir pada masing-masing fasa tidak memiliki nilai yang sama atau berbeda secara signifikan. Pada kondisi ideal, pembebanan pada setiap fasa harus dibagi secara merata sehingga arus pada fasa R, S, dan T memiliki nilai yang hampir sama. Namun dalam praktiknya kondisi ini jarang tercapai karena distribusi pelanggan pada jaringan tegangan rendah sering tidak merata pada setiap fasa. Akibatnya salah satu fasa dapat mengalami pembebanan yang lebih besar dibandingkan fasa lainnya.

Dalam sistem monitoring trafo distribusi, kondisi ketidakseimbangan beban menjadi salah satu parameter penting yang harus diperhatikan. Aplikasi SIMANTRA

(Sistem Monitoring Trafo) digunakan oleh PLN untuk melakukan pemantauan terhadap kondisi pembebanan trafo distribusi, termasuk untuk mendeteksi adanya ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi. Melalui aplikasi ini, data hasil pengukuran arus pada masing-masing fasa dapat dimasukkan ke dalam sistem dan kemudian dianalisis untuk mengetahui tingkat keseimbangan beban pada trafo. Gardu distribusi yang memiliki tingkat ketidakseimbangan melebihi batas tertentu akan ditandai dalam sistem sehingga dapat segera dilakukan evaluasi dan tindakan perbaikan.

Pada aplikasi SIMANTRA, gardu distribusi yang mengalami ketidakseimbangan beban akan ditampilkan dalam menu laporan atau informasi sebagai “beban gardu tidak seimbang”. Sistem akan menampilkan daftar gardu yang memiliki tingkat ketidakseimbangan beban di atas batas yang telah ditentukan. Dalam implementasinya, batas ketidakseimbangan yang digunakan biasanya sekitar 20% dari nilai pembebanan, sehingga gardu yang memiliki ketidakseimbangan lebih dari nilai tersebut dianggap perlu dilakukan penanganan atau redistribusi beban. Informasi ini dapat ditampilkan dalam bentuk laporan dan dapat diunduh dalam format tertentu untuk keperluan analisis lebih lanjut oleh petugas.

Ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi dapat disebabkan oleh berbagai faktor, salah satunya adalah penyambungan pelanggan yang tidak merata pada setiap fasa. Pada jaringan distribusi tegangan rendah, pelanggan rumah tangga umumnya menggunakan sistem satu fasa. Apabila banyak pelanggan yang terhubung pada satu fasa tertentu, maka fasa tersebut akan mengalami pembebanan yang lebih besar dibandingkan dengan fasa lainnya. Selain itu, perubahan pola konsumsi listrik pada pelanggan juga dapat menyebabkan perubahan pembebanan pada masing-masing fasa sehingga menimbulkan ketidakseimbangan pada sistem distribusi.

Dampak dari ketidakseimbangan beban gardu dapat mempengaruhi kinerja trafo distribusi maupun kualitas penyaluran energi listrik. Salah satu dampak yang paling sering terjadi adalah meningkatnya rugi-rugi daya pada jaringan distribusi. Ketidakseimbangan beban juga dapat menyebabkan peningkatan temperatur pada belitan

trafo sehingga mempercepat proses penuaan isolasi trafo. Selain itu, kondisi ini juga dapat menyebabkan penurunan kualitas tegangan pada jaringan distribusi yang dapat mempengaruhi kinerja peralatan listrik pelanggan.

Selain mempengaruhi kondisi trafo, ketidakseimbangan beban juga berkaitan erat dengan munculnya arus pada penghantar fasa netral. Pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat, penghantar netral berfungsi sebagai jalur arus balik dari beban satu fasa. Dalam kondisi pembebanan yang seimbang, arus pada masing-masing fasa akan saling meniadakan sehingga arus yang mengalir pada penghantar netral sangat kecil bahkan mendekati nol. Namun apabila terjadi ketidakseimbangan beban pada masing-masing fasa, maka akan muncul arus yang mengalir pada penghantar netral sebagai akibat dari perbedaan arus pada setiap fasa.

Besarnya arus yang mengalir pada penghantar netral sangat bergantung pada tingkat ketidakseimbangan beban yang terjadi. Semakin besar perbedaan arus antara fasa R, S, dan T, maka semakin besar pula arus yang mengalir pada penghantar netral. Arus netral yang besar dapat menyebabkan peningkatan temperatur pada penghantar netral serta meningkatkan rugi-rugi daya pada jaringan distribusi. Oleh karena itu, kondisi ini perlu dipantau secara berkala untuk menjaga keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

Aplikasi SIMANTRA membantu petugas dalam memantau kondisi tersebut dengan menyediakan data pembebanan trafo yang diperoleh dari hasil pengukuran di lapangan. Data tersebut kemudian dapat dianalisis untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan arus yang signifikan antara masing-masing fasa. Apabila sistem mendeteksi adanya ketidakseimbangan beban yang tinggi, maka gardu tersebut dapat segera ditindaklanjuti dengan melakukan penataan ulang pembagian beban pada setiap fasa.

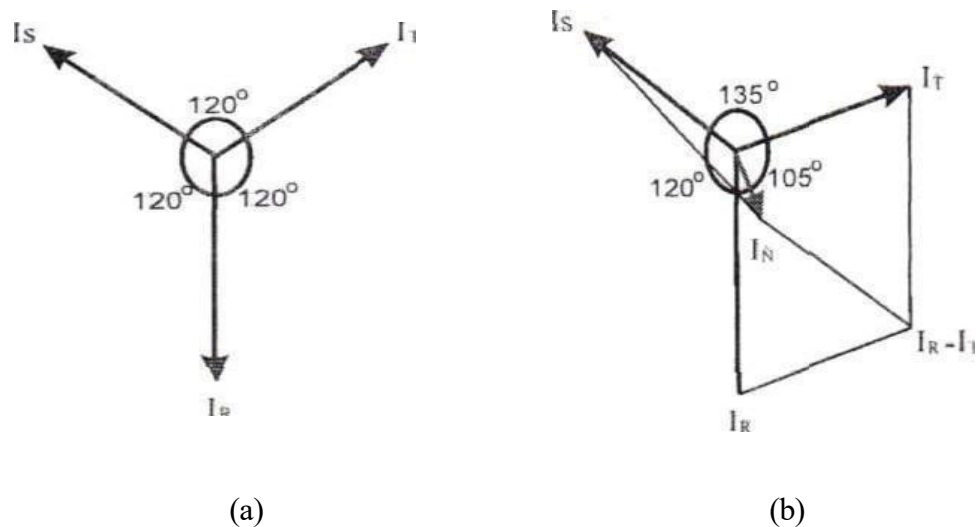
Dengan adanya sistem monitoring seperti SIMANTRA, proses identifikasi gardu yang mengalami ketidakseimbangan beban dapat dilakukan secara lebih cepat dan sistematis. Informasi yang diperoleh dari sistem ini dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan kegiatan pemeliharaan maupun perbaikan jaringan distribusi listrik.

ketidakseimbangan beban sering kali tidak dapat dihindari. Ketidakseimbangan ini disebabkan oleh:

1. Distribusi pelanggan yang tidak merata pada tiap fasa,
2. Variasi konsumsi energi dari waktu ke waktu,
3. Penambahan beban baru yang tidak mempertimbangkan proporsi arus antar fasa, serta Gangguan atau perubahan konfigurasi jaringan yang menyebabkan perubahan pembebanan.
4. Berdasarkan Pedoman Implementasi Sistem Monitoring Trafo (Simantra), gardu dinyatakan memiliki beban tidak seimbang apabila perbedaan arus antar fasa melebihi 20% dari nilai rata-rata arus ketiga fasa.

2.3.11. Arus Netral dan Peranannya

Dalam sistem tiga fasa empat kawat (R-S-T-N), penghantar netral berfungsi menyalurkan arus sisa akibat ketidakseimbangan beban antar fasa. Pada kondisi beban seimbang, arus di ketiga fasa memiliki besar yang sama dan berbeda sudut 120° , sehingga jumlah vektor arus fasa = 0. Dalam hal ini, tidak ada arus yang mengalir pada penghantar netral



Gambar 2.29 Vektor Diagram Arus

Gambar 1 (a) menggambarkan keadaan sistem tiga fasa dalam kondisi seimbang, di

mana jumlah vektor arus tiap fasa (I_r , I_s , I_t) menghasilkan nilai nol, sehingga tidak terdapat arus yang mengalir melalui penghantar netral. Namun, pada kondisi tidak seimbang seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1 (b), perbedaan besar atau sudut fasa antar arus menyebabkan resultan ketiga vektor arus tidak sama dengan nol. Kondisi ini menimbulkan munculnya arus netral (I_n) yang nilainya sebanding dengan tingkat ketidakseimbangan sistem.

2.3.12. Pemantauan Arus Netral pada aplikasi SIMANTRA

Sistem Simantra memungkinkan pemantauan arus netral secara tidak langsung melalui analisis perbedaan arus antar fasa. Hasil pengukuran lapangan yang dimasukkan oleh petugas akan diolah oleh sistem, dan apabila perbedaan arus antar fasa melebihi batas 20%, maka gardu tersebut akan muncul pada laporan “Beban Tidak Seimbang”.



The screenshot shows the ManTra application interface. The left sidebar contains navigation options: Dashboard, Peta Gardu, Master, Proses Data, Informasi, and Laporan. The main content area displays a table titled "DAFTAR GARDU KETIDAKSEIMBANGAN DIATAS : 50 PERSEN STATUS : PLN". The table has columns for UNITUP, NOGARDU, ALAMAT, DAYA, BEBAN (kVA, PERSEN), ARUS BEBAN (R-TOTAL, S-TOTAL, T-TOTAL, N-TOTAL), TEGANGAN (R-N, S-N, T-N), and KETIDAKSEIMBANGAN. The data rows show four different distribution units with their respective load and voltage measurements.

UNITUP	NOGARDU	ALAMAT	DAYA	BEBAN		ARUS BEBAN				TEGANGAN			KETIDAKSEIMBANGAN
				kVA	PERSEN	R-TOTAL	S-TOTAL	T-TOTAL	N-TOTAL	R-N	S-N	T-N	
41530	SFF022C	PERUM ASN 3	160	63.89	39.93	52.32	177.3	52.31	124	226.5	225.4	228	59.11
41530	SFF033C	GURAPING 6 (LAUNDRY)	250	1.57	.63	4.69	1.4	.84	7.21	227.9	227.8	222.4	68.69
41530	SFF037	TELKOMSEL GUB	25	4.67	18.7	20.94	0	0	21.16	221.6	224.8	223.2	133.33
41530	SFF044	BALISOSA	50	17.65	35.3	5.82	25.81	46.84	34.1	226.4	222.4	225.9	52.72

Gambar 2.30 Tampilan pada menu gardu beban tidak seimbang

Selain itu, beberapa unit PLN juga melakukan pengukuran langsung terhadap arus netral menggunakan *clamp meter* atau sensor arus digital, kemudian hasilnya diinput ke Simantra. Data ini penting untuk:

1. Menilai seberapa besar energi yang hilang akibat ketidakseimbangan beban,
2. Mengidentifikasi potensi titik panas (hot spot) pada penghantar netral, dan Merencanakan tindakan penyeimbangan beban yang lebih akurat.

Dengan demikian, Simantra tidak hanya berfungsi mendeteksi ketidakseimbangan antar fasa, tetapi juga membantu PLN dalam menganalisis arus netral sebagai indikator efisiensi operasi trafo.

2.4. Kerangka Pemikiran

Ketidakseimbangan beban antar fasa pada sistem distribusi tenaga listrik merupakan salah satu penyebab utama terjadinya rugi daya (*losses*) pada transformator distribusi. Dalam kondisi ideal, arus pada ketiga fasa (R, S, T) memiliki besar yang sama dengan sudut fasa berbeda 120° , sehingga resultan vektor arusnya bernilai nol dan tidak menimbulkan arus pada penghantar netral. Namun, pada kenyataannya distribusi pelanggan yang tidak merata antar fasa, penambahan beban tanpa evaluasi keseimbangan, serta variasi pola konsumsi energi menyebabkan terjadinya ketidakseimbangan arus. Ketidakseimbangan ini menghasilkan arus sisa yang mengalir melalui penghantar netral, di mana arus tersebut tidak menghasilkan daya aktif, tetapi tetap menimbulkan rugi daya berupa panas (I^2R losses) pada konduktor netral dan belitan transformator. Semakin besar perbedaan arus antar fasa, semakin besar pula arus netral yang timbul, yang berimplikasi pada meningkatnya rugi daya total sistem, penurunan efisiensi penyaluran energi, serta pemanasan berlebih pada transformator yang dapat mempercepat degradasi isolasi dan memperpendek umur operasi peralatan. Selain itu, ketidakseimbangan beban juga menyebabkan distorsi tegangan dan penurunan kualitas daya (*power quality*), yang berdampak langsung terhadap kestabilan pasokan listrik ke pelanggan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, PT PLN (Persero) mengembangkan Sistem Monitoring Trafo (Simantra) sebagai sistem berbasis web yang berfungsi untuk memantau kondisi operasional transformator secara digital dan *real-time*. Melalui Simantra, data hasil pengukuran arus dan tegangan tiap fasa dapat dikumpulkan, diolah, dan dianalisis untuk mendeteksi ketidakseimbangan beban, menghitung potensi rugi daya akibat arus netral, serta memberikan laporan *post-analysis* sebagai dasar tindakan korektif di lapangan. Dengan adanya sistem ini, petugas dapat melakukan redistribusi beban antar fasa, pemeliharaan preventif, atau penggantian transformator sebelum kerugian energi meningkat.

Dengandemikian, penerapan Simantra diharapkan mampu menekan rugi daya akibat arus netral,meningkatkan efisiensi energi, serta memperpanjang umur peralatan sekaligus mendukung transformasi digital PLN menuju sistem distribusi tenaga listrik yang andal dan berkelanjutan.