

TUGAS AKHIR

ANALISA PENGARUH TAHANAN KONTAK TERHADAP RUGI DAYA PADA PEMUTUS TENAGA (PMT) 150 KV DI GARDU INDUK GLUGUR

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Elektro Pada Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh:

YOGI PANGESTU

2107220044



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Yogi Pangestu
NPM : 2107220044
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Analisa Pengaruh Tahanan Kontak Terhadap Rugi Daya Pada Pemutus Tenaga (PMT) 150 KV Di Gardu Induk Glugur
Bidang ilmu : Sistem Tenaga

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, September 2025

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing I



Ir. Abdul Aziz Hutasuht M.M

Dosen Pembimbing I / Penguji



Faisal Irsan Pasaribu, S.T, M.T

Dosen Pembimbing II / Peguji



Dr. Elvy Sahnur Nst., ST., M.Pd



SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Yogi Pangestu
Tempat /Tanggal Lahir : Medan/14 Juni 2003
NPM : 2107220044
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

“Analisa Pengaruh Tahanan Kontak Terhadap Rugi Daya Pada Pemutus Tenaga (PMT) 150 KV Di Gardu Induk Glugur”,

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, September 2025

Saya yang menyatakan,



Yogi Pangestu

ABSTRAK

Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan penting dalam sistem transmisi 150 kV yang berfungsi untuk memutus dan menghubungkan aliran listrik secara aman. Salah satu parameter kritis pada PMT adalah nilai tahanan kontak pada sambungan konduktor. Peningkatan tahanan kontak dapat menimbulkan rugi daya (I^2R), pemanasan berlebih, serta kerugian energi yang berdampak pada efisiensi dan keandalan sistem tenaga. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh tahanan kontak terhadap rugi daya, susut energi, dan kerugian biaya listrik pada PMT 150 kV di Gardu Induk Glugur. Metode penelitian dilakukan dengan pengukuran tahanan kontak menggunakan micro-ohm meter pada enam lokasi PMT yang masing-masing terdiri dari tiga fasa (R, S, T) pada dua periode pengamatan, yaitu tahun 2022 dan 2024. Data arus beban diperoleh dari panel kontrol, kemudian digunakan untuk menghitung rugi daya dengan persamaan $P=I^2R$. Nilai rugi daya dikonversi menjadi energi hilang berdasarkan asumsi waktu operasi 720 jam (1 bulan), lalu dihitung kerugiannya dalam bentuk biaya menggunakan tarif listrik Rp1.699,53/kWh. Hasil pengujian menunjukkan adanya variasi nilai tahanan kontak antar lokasi dan antar tahun pengamatan, dengan nilai tertinggi tercatat pada Bay Trafo 3 tahun 2024 sebesar 67,3 $\mu\Omega$. Nilai tahanan kontak yang lebih tinggi berdampak langsung pada peningkatan rugi daya, energi hilang, dan biaya susut listrik. Biaya terbesar tercatat pada Bay Paya Geli 2 fasa S tahun 2022 sebesar Rp6.142,78, sedangkan biaya terkecil terjadi pada Bay Trafo 2 fasa R tahun 2022 sebesar Rp1.492,86. Penelitian ini menegaskan pentingnya pemantauan periodik dan pemeliharaan preventif PMT untuk menekan rugi daya akibat kenaikan tahanan kontak, meminimalkan kerugian energi, serta menjaga efisiensi operasi sistem transmisi 150 kV.

Kata kunci : *Pemutus tenaga (PMT), Gardu Induk, Tahanan kontak, Rugi daya.*

ABSTRACT

Circuit Breaker (CB) is an essential component in a 150 kV transmission system that functions to safely interrupt and reconnect electrical current flow. One of the critical parameters in a CB is the contact resistance at the conductor connection. An increase in contact resistance can cause power loss (I^2R), excessive heating, and energy losses that affect the efficiency and reliability of the power system. This study aims to analyze the effect of contact resistance on power loss, energy loss, and electricity cost loss in 150 kV circuit breakers at the Glugur Substation. The research method involved measuring contact resistance using a micro-ohm meter at six CB locations, each consisting of three phases (R, S, T), during two observation periods: 2022 and 2024. Load current data were obtained from the control panel and used to calculate power loss using the equation $P = I^2R$. The calculated power loss was then converted into energy loss based on an assumed operating time of 720 hours (one month) and subsequently into cost loss using an electricity tariff of Rp1,699.53/kWh. The test results showed variations in contact resistance values across locations and observation years, with the highest value recorded at Bay Trafo 3 in 2024, measuring 67.3 $\mu\Omega$. Higher contact resistance values directly increased power losses, energy losses, and electricity cost losses. The highest cost was recorded at Bay Paya Geli 2 phase S in 2022, amounting to Rp6,142.78, while the lowest occurred at Bay Trafo 2 phase R in 2022, amounting to Rp1,492.86. This study emphasizes the importance of periodic monitoring and preventive maintenance of circuit breakers to minimize power losses caused by increased contact resistance, reduce energy losses, and maintain the operational efficiency of the 150 kV transmission system.

Keywords : *Contact resistance, Power loss, Circuit breaker, Glugur Substation.*

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Analisa Pengaruh Tahanan Kontak Terhadap Rugi Daya Pada Pemutus Tenaga (PMT) 150 Kv Di Gardu Induk Glugur”. Shalawat berangkai salam penulis haturkan kepada junjungan besar Nabi Muhammad SAW yang membawa dua pedoman hidup yakni Al-Qur'an dan Hadist yang jika kita berpegang teguh terhadap keduanya insyaallah kita selamat dunia dan akhirat.

Dalam proses pembuatan skripsi ini penulis banyak mendapatkan masukan, arahan, bimbingan, bantuan baik secara moral dan material dari berbagai pihak. Untuk hal itu penulis ingin menyampaikan rasa terimakasih kepada :

1. Orang tua tercinta yang telah melahirkan, membesarkan, mendoakan dan senantiasa mendukung penulis dalam segala aspek, Ayahanda Suheri dan Ibunda Rosnan Sari Telaumbanua serta kakak penulis Intan Sri Harningsih.
2. Bapak Ir. Abdul Aziz Hutasuhut, MM. sebagai dosen pembimbing yang dalam pembuatan skripsi ini memberikan bantuan, dukungan serta arahan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak Faisal Irsan Pasaribu, ST., MT. dan Ibu Dr. Elvy Sahnur Nst., ST., M.Pd. selaku dosen penguji yang dalam pembuatan skripsi memberikan masukan serta arahan sehingga penulis dapat menyusun skripsi ini dengan baik.
4. Ibu Dr. Elvy Sahnur Nst., ST., M.Pd. sebagai Ketua Program Studi Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. Seluruh dosen program studi teknik elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah mengajarkan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis dari semester pertama hingga sampai saat ini.
5. Sahabat penulis Farhan Afidal, Iwan Prayogo, Ragil Rean Wijaya, Reski Abadi, Rizki Wahyu Ramdana M, Syahrul Ramadan, dan Yamin Azhari yang telah membantu dalam pembuatan skripsi ini.

6. Teman-teman angkatan 2021 Jurusan Elektro Fakultas Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara dan semua pihak yang turut membantu yang tidak mungkin penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan sehingga penulis mengharapkan kritik serta saran yang membangun demi kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat menjadi inspirasi bagi pembaca dan bermanfaat untuk semua. Aamiin yaa rabbal ‘alamin.

Medan, Juni 2025

Yogi Pangestu

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Ruang Lingkup.....	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Tinjauan Pustaka Relevan	6
2.2 Kerangka Teoritis / Tinjauan Teoritis	8
2.2.1 Gardu induk	8
2.2.2 Fungsi Gardu Induk	9
2.2.3 Jenis-jenis Gardu Induk	9
2.2.3 Peralatan Gardu Induk	16
2.2.4 Pemutus Tenaga (PMT) atau <i>Circuit Breaker</i> (CB)	25
2.2.5 Tahanan Kontak pada PMT	33
2.2.6 Rugi Daya pada PMT	34
BAB III METODOLOGI	36
3.1 Waktu Dan Tempat Penelitian	36
3.2 Bahan Dan Alat	36
3.2.1 Pemutus Tenaga (PMT)	37

3.2.2 Laptop	40
3.2.3 Kalkulator	40
3.2.4 Alat Ukur Tahanan Kontak.....	41
3.2.5 Software	41
3.2.6 Alat Ukur Keserempakan Kontak.....	42
3.3 Prosedur Pengujian Tahanan Kontak	42
3.4 Bagan Alir Penelitian	45
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	46
4.1 Pengujian Tahanan Kontak	46
4.1.1 Perhitungan Rugi Daya Penghantar	48
4.1.2 Perhitungan susut energi listrik.....	54
4.1.3 Perhitungan biaya listrik	59
4.2 Pengujian Keserempakan Kontak	65
4.2.1 Pengujian Keserempakan Open	65
4.2.2 Pengujian Keserempakan Close.....	68
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	71
5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran.....	71
DAFTAR PUSTAKA	73
LAMPIRAN.....	76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Gardu Induk Pasangan Luar	11
Gambar 2. 2 Gardu Induk Pasangan Dalam	12
Gambar 2. 3 Singel Line Diagram Sistem Singel Busbar	14
Gambar 2. 4 Singel Line Diagram Sistem Double Busbar.....	15
Gambar 2. 5 Singel Line Diagram Sistem Ring Busbar.....	15
Gambar 2. 6 Singel Line Diagram Sistem Satu Setengah Busbar.....	16
Gambar 2. 7 Trafo Daya	17
Gambar 2. 8 Saklar Pemisah (PMS).....	19
Gambar 2. 9 Lightning Arrester (LA)	20
Gambar 2. 10 Transformator arus.....	20
Gambar 2. 11 Trafo tegangan	21
Gambar 2. 12 Trafo Pemakaian Sendiri	21
Gambar 2. 13 Rel Busbar	22
Gambar 2. 14 Panel Kontrol	23
Gambar 2. 15 Kubikel 20 kV.....	24
Gambar 2. 16 Macam – Macam PMT	27
Gambar 2. 17 PMT Singel Pole.....	27
Gambar 2. 18 PMT Three Pole.....	28
Gambar 3. 1 Laptop.....	40
Gambar 3. 2 Kalkulator	40
Gambar 3. 3 Micro Ohm Meter	41
Gambar 3. 4 Circuit Breaker Analyzer	42
Gambar 3. 5 Skema pengujian tahanan kontak	43
Gambar 3. 6 Flowchart Penelitian	45
Gambar 4. 1 Grafik Perbandingan Tahanan Kontak.....	47
Gambar 4. 2 Grafik Perbandingan Rugi Daya.....	54
Gambar 4. 3 Grafik Hasil Perhitungan Susut Energi	59
Gambar 4. 4 Grafik Hasil Perhitungan Biaya Listrik	64

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Waktu Pelaksanaan Penelitian.....	36
Tabel 3. 2 Nameplate PMT Bay Trafo Daya 1	37
Tabel 3. 3 Nameplate PMT Bay Trafo Daya 2.....	38
Tabel 3. 4 Nameplate PMT Bay Trafo Daya 3.....	38
Tabel 3. 5 Nameplate PMT Bay Penghantar Glugur-P.Geli 1	39
Tabel 3. 6 Nameplate PMT Bay Penghantar Glugur-P.Geli 2	39
Tabel 4. 1 Data Tahanan Kontak	46
Tabel 4. 2 Data Arus.....	49
Tabel 4. 3 Hasil perhitungan rugi daya	53
Tabel 4. 4 Hasil perhitungan susut energi listrik	58
Tabel 4. 5 Tarif Dasar Listrik	60
Tabel 4. 6 Hasil perhitungan biaya listrik selama 1 bulan	64
Tabel 4. 7 Data Pengujian Waktu Open	66
Tabel 4. 8 Perbandingan Keserempakan Open Terhadap Standar	67
Tabel 4. 9 Data Pengujian Waktu Close.....	68
Tabel 4. 10 Perbandingan Keserempakan Close Terhadap Standar.....	69

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik merupakan aspek vital dalam kehidupan modern yang berperan penting dalam mendorong perkembangan ekonomi suatu negara. Penggunaannya meliputi berbagai sektor, seperti industri, komersial, dan rumah tangga, serta membantu meningkatkan efisiensi dan produktivitas dalam berbagai aktivitas (Sapthu, 2023).

Seiring dengan perkembangan teknologi dan pertumbuhan populasi, kebutuhan akan listrik terus meningkat secara signifikan. Pertumbuhan ini didorong oleh meningkatnya jumlah pengguna listrik, ekspansi industri, serta digitalisasi yang semakin meluas di berbagai sektor kehidupan. Kebutuhan listrik yang semakin meningkat ini menuntut adanya sistem tenaga listrik yang efisien, handal, dan berkelanjutan guna menjamin pasokan listrik yang stabil bagi masyarakat (Mulyani & Hartono, 2018).

Untuk memenuhi kebutuhan listrik yang terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan perkembangan teknologi, sistem tenaga listrik harus dirancang agar mampu menyalurkan energi secara efisien, andal, dan berkelanjutan dari pusat pembangkit hingga ke konsumen akhir. Hal ini mencakup optimalisasi proses transmisi dan distribusi, penggunaan peralatan berteknologi tinggi, serta pemeliharaan infrastruktur yang tepat agar kehilangan daya dapat diminimalkan dan pasokan listrik tetap stabil di seluruh wilayah (Sumiyati et al., 2024).

Proses penyaluran energi listrik diawali dari pembangkitan listrik di pusat-pusat pembangkit, seperti Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA), Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS), maupun Pusat Listrik Tenaga Bayu atau Angin (PLTB). Energi listrik

yang dihasilkan oleh pembangkit tersebut kemudian dinaikkan tegangannya menggunakan transformator daya agar dapat disalurkan secara efisien melalui jaringan transmisi tegangan tinggi ke wilayah-wilayah yang membutuhkan. Setelah mencapai daerah tujuan, tegangan listrik diturunkan kembali melalui gardu induk transmisi menjadi tegangan menengah, lalu dialirkan melalui jaringan distribusi ke gardu distribusi. Di gardu distribusi, tegangan kembali diturunkan menjadi tegangan rendah agar sesuai dengan kebutuhan konsumen, baik rumah tangga, industri, maupun perkantoran. Dengan demikian, energi listrik dapat didistribusikan secara aman dan efisien dari pembangkit hingga sampai ke pengguna akhir (Aribowo & Desmira, 2018).

Dalam jaringan transmisi, tegangan listrik yang tinggi digunakan untuk meminimalkan rugi-rugi daya selama perjalanan menuju gardu induk. Tegangan tinggi memungkinkan pengiriman daya listrik dengan rugi daya yang lebih kecil karena mengurangi arus yang mengalir, sehingga resistansi konduktor tidak menyebabkan kehilangan daya yang signifikan (Sya'roni & Rijanto, 2019).

Gardu induk memiliki peran yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik karena berfungsi sebagai penghubung antara jaringan transmisi dan distribusi. Di dalam gardu induk, tegangan listrik yang dikirim dari pembangkit diturunkan agar sesuai dengan kebutuhan pelanggan. Salah satu komponen utama dalam gardu induk adalah pemutus tenaga (PMT), yang bertanggung jawab dalam menghubungkan dan memutuskan aliran listrik secara aman, baik dalam kondisi operasi normal maupun saat terjadi gangguan. Oleh karena itu, PMT harus memiliki keandalan tinggi untuk menjaga stabilitas sistem tenaga listrik, terutama dalam jaringan bertegangan tinggi (Susanto et al., 2021)

Kerusakan pada PMT dapat menyebabkan gangguan serius terhadap keseluruhan operasi sistem tenaga listrik. Jika PMT gagal berfungsi saat terjadi gangguan, arus gangguan yang tidak terputus dapat merusak peralatan lain dan berpotensi mengakibatkan ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, pengujian yang dilakukan diharapkan dapat memperpanjang usia operasional

PMT dengan kinerja optimal, sehingga meningkatkan kualitas sistem tenaga listrik secara keseluruhan (Susanto et al., 2021).

Salah satu faktor yang sangat mempengaruhi kinerja PMT adalah tahanan kontak. Tahanan kontak merupakan hambatan listrik yang muncul pada titik pertemuan dua permukaan konduktor. Nilai tahanan kontak yang tinggi dapat menyebabkan rugi-rugi daya yang signifikan dalam sistem tenaga listrik. Dalam sistem tegangan tinggi, meskipun arus listrik yang mengalir lebih kecil dibandingkan dengan sistem tegangan rendah, keberadaan tahanan kontak tetap memberikan dampak terhadap efisiensi energi dan umur operasional perangkat (Napitupulu & Iriani, 2022).

Rugi daya akibat tahanan kontak juga memiliki dampak ekonomi bagi perusahaan penyedia listrik, karena adanya energi listrik yang terbuang. Tahanan kontak sebaiknya memiliki nilai sekecil mungkin dan sedekat mungkin dengan nol. Setiap PMT memiliki tahanan kontak yang memengaruhi tingkat rugi daya pada penghantar. Semakin besar nilai tahanan, semakin tinggi rugi daya yang terjadi, karena rugi daya diperoleh dari perkalian antara arus yang mengalir dan tahanan pada kontak (Setyawan, 2018).

Tahanan kontak yang tinggi tidak hanya dipengaruhi oleh faktor teknis tetapi juga oleh kondisi lingkungan. Faktor lingkungan seperti kelembaban udara, polusi, serta akumulasi debu dan korosi pada permukaan kontak dapat mempercepat peningkatan resistansi listrik (Wisnu Kuncoro Jati Rochman, 2024). Oleh karena itu, Pemeriksaan dan pemeliharaan rutin terhadap tahanan kontak PMT perlu dilakukan secara berkala. Selain mengikuti jadwal periodik, sebaiknya juga dipertimbangkan berdasarkan frekuensi operasi buka tutup PMT (Napitupulu & Iriani, 2022).

Penelitian ini akan menganalisis secara mendalam bagaimana tahanan kontak mempengaruhi rugi daya pada PMT di Gardu Induk 150 kV Glugur. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi dalam upaya

meningkatkan efisiensi sistem tenaga listrik serta mengurangi dampak negatif dari rugi daya akibat tahanan kontak yang tinggi. Dengan adanya analisis yang komprehensif, diharapkan dapat diperoleh solusi yang tepat guna mendukung keandalan serta kestabilan sistem tenaga listrik di Indonesia. Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengelola sistem tenaga listrik dalam melakukan pemeliharaan dan perbaikan PMT guna meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil pengukuran nilai tahanan kontak pada PMT 150 kV di Gardu Induk Glugur dalam dua periode waktu pemeliharaan (2022 dan 2024)?
2. Bagaimana pengaruh tahanan kontak pada PMT terhadap besarnya rugi daya dan kerugian biaya listrik dalam sistem tenaga 150 kV di Gardu Induk Glugur?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

1. Mengetahui nilai tahanan kontak pada PMT 150 kV berdasarkan hasil pengukuran pada dua periode waktu, yaitu tahun 2022 dan 2024.
2. Menganalisis pengaruh tahanan kontak terhadap besarnya rugi daya dan estimasi kerugian biaya listrik pada sistem tenaga 150 kV di Gardu Induk Glugur.

1.4 Ruang Lingkup

Agar penelitian ini dapat dilakukan secara terfokus dan sistematis, ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada beberapa aspek berikut:

1. Penelitian difokuskan pada pengukuran tahanan kontak pada beberapa titik PMT dan ketiga fasenya (R, S, T), berdasarkan data pengujian lapangan tahun 2022 dan 2024.
2. Dihitung pula besarnya rugi daya dan estimasi kerugian biaya listrik akibat perubahan nilai tahanan kontak.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat sebagai berikut:

1. Menyediakan analisis mengenai pengaruh kondisi teknis terhadap perubahan nilai tahanan kontak pada PMT.
2. Memberikan informasi kuantitatif terkait nilai tahanan kontak aktual di Gardu Induk Glugur, yang dapat dijadikan dasar evaluasi kondisi peralatan.
3. Memberikan gambaran tentang dampak perubahan tahanan kontak terhadap efisiensi energi dan biaya operasional, sehingga dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam perencanaan pemeliharaan dan pengambilan keputusan teknis di gardu induk.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka Relevan

Dalam penelitian ini, penulis merujuk pada berbagai penelitian sebelumnya yang memiliki relevansi dengan topik yang sedang dikaji. Penelitian-penelitian terdahulu tersebut digunakan sebagai landasan teoritis dan referensi dalam menganalisis serta memahami berbagai aspek yang berkaitan dengan penelitian ini. Berikut ini disajikan beberapa hasil penelitian yang dianggap relevan dan dijadikan bahan kajian serta pertimbangan dalam menyusun kerangka penelitian yang lebih komprehensif.

Pranomo (2019), dalam tugas akhirnya yang berjudul *"Analisis Pengujian Pemutus Tenaga Bay Gondangrejo 2 dalam Pemeliharaan Dua Tahunan di Gardu Induk Palur"*, mengevaluasi kinerja pemutus tenaga (PMT) di lokasi tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa secara keseluruhan, PMT Bay Gondangrejo 2 di Gardu Induk Palur masih dalam kondisi layak operasi dan berfungsi dengan baik. Selain itu, berdasarkan hasil pemeliharaan selama tiga periode terakhir, nilai tahanan isolasi, tahanan pentanahan, tahanan kontak, serta keserempakan kontak PMT tetap berada di bawah batas yang telah ditetapkan dalam standar PLN (O&M P3B PMT/001.01 Tahun 2009), sehingga masih memenuhi persyaratan operasional.

Napitupulu dan Iriani (2022), dalam tugas akhirnya yang berjudul *"Pengaruh Tahanan Kontak Pada Pemutus Tenaga 150 KV Terhadap Rugi Daya di PT PLN (Persero) ULTG Sidikalang"*, mengkaji nilai tahanan kontak rata-rata per fase pada beberapa bay di sistem tenaga listrik, yaitu bay penghantar Sidikalang-Tele, bay Trafo Daya I, dan bay penghantar Sidikalang-Renun, yang masing-masing memiliki nilai sebesar $39,45 \mu\Omega$, $31,6 \mu\Omega$, dan $41,8 \mu\Omega$. Tahanan kontak ini berkontribusi terhadap rugi daya listrik pada masing-masing PMT, dengan nilai sebesar 29,14 Watt, 66,05 Watt, dan 27,45 Watt.

Mereka juga mengungkapkan bahwa peningkatan tahanan kontak ini disebabkan oleh beberapa faktor utama, termasuk ketidaksempurnaan koneksi pada kontak utama PMT akibat kegagalan mekanisme kerja, keausan atau cacat pada permukaan kontak utama akibat gesekan saat operasi PMT, serta akumulasi kotoran pada terminal akibat flashover selama pengoperasian. Untuk mengatasi permasalahan ini, dilakukan perbaikan dengan membersihkan sambungan terminal menggunakan kertas pasir serta menerapkan pelumas anti karat guna mengoptimalkan kinerja PMT.

Darminto (2022), dalam tugas akhirnya yang berjudul "*Analisis Pengukuran Tahanan Kontak dan Tahanan Pertanahan Pada Pemutus Tenaga*", melakukan pengukuran menggunakan alat micro ohm meter. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai tahanan kontak untuk masing-masing fasa, yakni R, S, dan T, adalah $38\ \mu\Omega$, $89\ \mu\Omega$, dan $40\ \mu\Omega$. Nilai-nilai tersebut tergolong baik karena berada di bawah ambang batas $100\ \mu\Omega$, yang mengindikasikan bahwa pemutus tenaga masih dalam kondisi optimal dan layak digunakan. Dalam sistem pemutus tenaga (PMT), nilai tahanan kontak memiliki pengaruh yang signifikan, sebab tingginya tahanan kontak dapat memicu peningkatan suhu dan menyebabkan kerugian teknis. Analisis perbandingan antara hasil pengukuran menggunakan micro ohm meter dan perhitungan manual menunjukkan bahwa perbedaan nilai tahanan kontak untuk masing-masing fasa R, S, dan T relatif kecil. Selain itu, tingkat kesalahan yang diperoleh dari perbandingan tersebut tergolong rendah, dengan persentase di bawah 1%.

Jabar et al. (2024), dalam penelitian mereka yang berjudul "*Analisis Tahanan Kontak dan Tahanan Pentanahan pada PMT 150 kV di ULTG Panakukang*", telah melakukan pengukuran tahanan kontak pada PMT di ULTG Panakukang menggunakan *micro-ohm meter* yang menunjukkan hasil sebesar $32,3\ \mu\Omega$, $30,9\ \mu\Omega$, dan $32,1\ \mu\Omega$ untuk masing-masing fasa R, S, dan T. Nilai-nilai tersebut masih tergolong baik karena berada di bawah ambang batas $100\ \mu\Omega$, sehingga pemutus tenaga dinilai dalam kondisi optimal dan layak untuk dioperasikan.

Selain itu, mereka juga berpendapat bahwa pemeriksaan rutin serta pemeliharaan berkala sangat penting untuk memastikan bahwa nilai tahanan kontak tetap berada dalam batas aman guna mencegah peningkatan suhu berlebih yang dapat menyebabkan kerusakan lebih lanjut atau kegagalan fungsi PMT. Pengukuran tahanan pentanahan juga harus dilakukan menggunakan alat ukur khusus untuk resistansi tanah, dengan ketentuan bahwa nilai yang diperoleh tidak boleh melebihi standar PUIL 2000, yaitu sebesar 1 ohm, agar sistem tetap beroperasi sesuai dengan standar keselamatan yang berlaku.

Winantara & Husodo (2019), dalam penelitian mereka yang berjudul *"Evaluasi Tahanan Kontak Pemutus Tenaga Tegangan Tinggi di Gardu Induk 150 kV Bandung Selatan Berdasarkan Failure Mode Effect Analysis (FMEA)"*, menyimpulkan bahwa terdapat beberapa faktor yang berkontribusi terhadap perubahan nilai tahanan kontak pada pemutus tenaga. Salah satu faktor utama adalah degradasi kualitas media peredam busur api, yang disebabkan oleh frekuensi operasi PMT yang sudah terlalu tinggi serta usia peralatan yang semakin menua. Selain itu, perubahan struktur penyangga mekanik juga berpengaruh terhadap perubahan posisi dan tingkat kerapatan kontak utama, yang pada akhirnya berdampak pada nilai tahanan kontak PMT.

2.2 Kerangka Teoritis / Tinjauan Teoritis

2.2.1 Gardu induk

Gardu Induk merupakan sub sistem dari sistem penyaluran (transmisi) tenaga listrik, atau merupakan satu kesatuan dari sistem penyaluran (transmisi). Penyaluran (transmisi) merupakan sub sistem dari sistem tenaga listrik. Berarti, gardu induk merupakan sub-sistem dari sistem tenaga listrik. Sebagai sub sistem dari sistem penyaluran (transmisi), gardu induk mempunyai peranan penting, dalam pengoperasiannya tidak dapat dipisahkan dari sistem penyaluran (transmisi) secara keseluruhan (Yusniati et al., 2019).

2.2.2 Fungsi Gardu Induk

Fungsi utama dari gardu induk yaitu untuk mentransformasikan daya listrik, contohnya seperti :

- 1) Dari tegangan ekstra tinggi ke tegangan tinggi (500 kV/150 kV).
- 2) Dari tegangan tinggi ke tegangan yang lebih rendah (150 kV/70 kV).
- 3) Dari tegangan tinggi ke tegangan menengah (150 kV/20 kV, 70 kV/20 kV).

Selain itu, gardu induk juga memiliki peran penting dalam menerima serta menyalurkan energi listrik dengan tingkat tegangan yang sesuai, memastikan proses distribusi berlangsung secara aman dan andal. Selain mendukung kelancaran penyaluran daya, gardu induk juga berfungsi sebagai titik penghubung dalam mendistribusikan listrik ke gardu induk lainnya maupun ke gardu distribusi melalui jaringan penyulang tegangan menengah.

2.2.3 Jenis-jenis Gardu Induk

Terdapat berbagai jenis gardu induk yang dapat ditemukan, yang diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori, yaitu :

1. Berdasarkan Fungsinya

Gardu induk, sebagai komponen vital dalam sistem tenaga listrik, dapat diklasifikasikan berdasarkan fungsinya menjadi beberapa jenis:

1) Gardu Induk Penaik Tegangan (*Step-Up Substation*)

Gardu ini berfungsi untuk menaikkan tegangan listrik yang dihasilkan oleh pembangkit (generator) ke tingkat tegangan yang lebih tinggi sesuai dengan kebutuhan sistem transmisi. Peningkatan tegangan ini bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi daya selama proses transmisi jarak jauh.

2) Gardu Induk Penurun Tegangan (*Step-Down Substation*)

Gardu ini berperan menurunkan tegangan tinggi dari jaringan transmisi ke tingkat tegangan yang lebih rendah, sesuai dengan kebutuhan distribusi ke konsumen akhir. Proses penurunan tegangan ini memastikan bahwa listrik yang diterima oleh konsumen berada pada level yang aman dan sesuai standar.

3) Gardu Induk Pengatur Tegangan (*Voltage Regulator Substation*)

Terletak jauh dari pembangkit listrik, gardu ini berfungsi untuk mengatasi penurunan tegangan yang terjadi akibat jarak transmisi yang panjang. Dengan menggunakan perangkat seperti kapasitor bank, gardu ini menstabilkan dan menormalkan kembali tegangan listrik dalam jaringan.

4) Gardu Induk Pengatur Beban (*Load Control Substation*)

Gardu ini dilengkapi dengan perangkat motor untuk mengatur distribusi beban listrik dalam jaringan. Fungsi utamanya adalah memastikan distribusi beban yang seimbang dan efisien, sehingga mencegah kelebihan beban pada bagian tertentu dari jaringan listrik.

5) Gardu Induk Distribusi (*Distribution Substation*)

Gardu ini berfungsi sebagai penghubung antara jaringan transmisi dan sistem distribusi listrik. Tegangan yang masuk ke gardu distribusi biasanya berasal dari gardu induk step-down, kemudian diturunkan ke tingkat yang sesuai sebelum didistribusikan ke konsumen industri, komersial, dan rumah tangga.

2. Berdasarkan Besaran Tegangan

Berdasarkan tingkat tegangannya, gardu induk diklasifikasikan menjadi dua kategori utama. Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET), beroperasi pada level tegangan yang sangat tinggi, yaitu 500 kV dan 275 kV, yang umumnya digunakan dalam sistem transmisi jarak jauh untuk meminimalkan rugi-rugi daya.

Sementara itu, Gardu Induk Tegangan Tinggi (GI) berfungsi pada tegangan 150 kV dan 70 kV, memainkan peran krusial dalam mendistribusikan daya listrik ke jaringan yang lebih kecil sebelum mencapai konsumen akhir.

3. Berdasarkan Penempatan Peralatannya

Gardu induk dapat diklasifikasikan berdasarkan pemasangan peralatannya menjadi beberapa jenis, yaitu:

1) Gardu Induk Pasangan Luar (*Outdoor Substation*)

Gardu induk jenis ini biasa disebut dengan gardu induk konvensional, dirancang dengan menempatkan peralatan listrik tegangan tinggi, seperti pemutus tenaga (*circuit breaker*), isolator, busbar, dan transformator, di area terbuka tanpa perlindungan atap. Meskipun lebih rentan terhadap pengaruh lingkungan seperti hujan, debu, dan kelembaban, gardu induk pasangan luar memiliki beberapa keuntungan, seperti biaya pembangunan yang lebih rendah karena tidak memerlukan gedung khusus untuk instalasi peralatan listrik.

Selain itu, sistem pendinginan transformator lebih efektif karena sirkulasi udara yang lebih baik di ruang terbuka. Namun, untuk menjaga keandalan operasional, pemeliharaan rutin harus dilakukan lebih sering guna menghindari dampak buruk dari faktor lingkungan yang dapat mempercepat degradasi peralatan listrik. Gardu induk jenis ini biasanya digunakan di daerah dengan lahan yang luas dan kondisi lingkungan yang tidak ekstrem.



Gambar 2. 1 Gardu Induk Pasangan Luar

2) Gardu Induk Pasangan Dalam (*Indoor Substation*)

Berbeda dengan gardu induk pasangan luar, jenis gardu ini menempatkan hampir seluruh peralatan listrik tegangan tinggi di dalam ruangan atau bangunan tertutup. Hal ini bertujuan untuk melindungi peralatan dari cuaca ekstrem, polusi udara, dan risiko gangguan eksternal seperti hewan liar atau vandalisme.

Salah satu bentuk modern dari gardu induk pasangan dalam adalah Gas Insulated Substation (GIS), di mana peralatan listriknya menggunakan gas SF₆ (sulfur hexafluoride) sebagai isolator guna mengurangi ukuran peralatan dan meningkatkan efisiensi operasional.

GIS sering digunakan di wilayah perkotaan dengan keterbatasan lahan karena desainnya yang lebih kompak dibandingkan dengan gardu induk konvensional. Meskipun lebih terlindungi, gardu induk pasangan dalam memiliki biaya instalasi yang lebih tinggi karena memerlukan bangunan khusus serta sistem ventilasi dan pendinginan yang lebih kompleks untuk menjaga suhu operasional peralatan.



Gambar 2. 2 Gardu Induk Pasangan Dalam

3) Gardu Induk Kombinasi Pasangan Dalam dan Luar

Jenis gardu induk ini merupakan gabungan dari gardu pasangan luar dan pasangan dalam, di mana beberapa peralatan seperti *switchgear* dan sistem kendali ditempatkan di dalam ruangan untuk perlindungan yang lebih

baik, sementara komponen lainnya, seperti transformator dan pemutus tenaga utama, diletakkan di luar untuk memanfaatkan sirkulasi udara alami. Gardu induk kombinasi ini banyak digunakan di lokasi dengan keterbatasan ruang atau kondisi lingkungan tertentu yang membutuhkan perlindungan sebagian dari peralatan listrik.

Keunggulan dari jenis ini adalah fleksibilitas dalam perancangan, di mana peralatan yang lebih sensitif dapat ditempatkan di dalam bangunan tertutup, sementara peralatan dengan daya tahan lebih tinggi terhadap lingkungan dapat tetap berada di luar ruangan untuk efisiensi biaya dan operasional. Namun, desain dan pemeliharaannya memerlukan pendekatan yang lebih kompleks untuk memastikan integrasi yang optimal antara peralatan dalam dan luar ruangan.

4. Berdasarkan Isolasi yang Digunakan

Gardu induk dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis isolasi yang digunakan, yaitu:

1) Gardu Induk dengan Isolasi Udara (*Air Insulated Substation* - AIS)

Pada jenis ini, udara berfungsi sebagai media isolasi antara komponen bertegangan. Umumnya, peralatan listrik seperti pemutus tenaga, isolator, dan busbar ditempatkan di area terbuka, sehingga memerlukan lahan yang luas. Gardu induk tipe ini sering disebut sebagai gardu induk konvensional.

2) Gardu Induk dengan Isolasi Gas SF₆ (*Gas Insulated Substation* - GIS)

Gardu induk ini menggunakan gas sulfur heksafluorida (SF₆) sebagai media isolasi. Gas SF₆ memiliki sifat dielektrik yang tinggi, memungkinkan peralatan listrik ditempatkan dalam ruang tertutup yang lebih kompak. Oleh karena itu, GIS cocok untuk area dengan keterbatasan lahan, seperti di perkotaan.

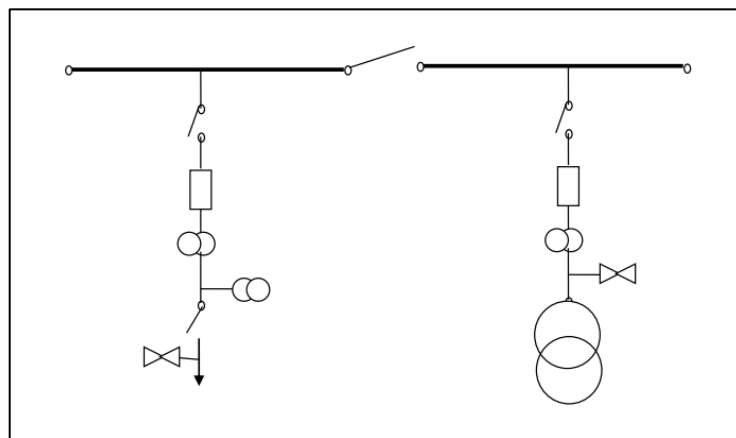
5. Berdasarkan Sistem Rel (Busbar)

Busbar berfungsi sebagai titik koneksi (*connecting*) utama yang mengintegrasikan transformator daya dengan berbagai komponen listrik lainnya, berperan dalam proses penerimaan serta penyaluran energi listrik secara efisien dalam sistem tenaga.

Gardu induk dapat diklasifikasikan berdasarkan konfigurasi sistem rel (busbar) yang digunakan. Berikut adalah beberapa jenis gardu induk berdasarkan sistem busbar:

1) Gardu Induk Sistem Single Busbar

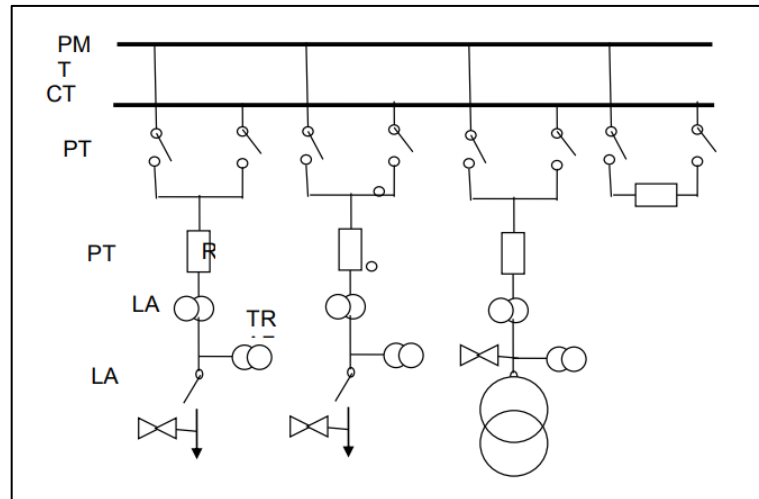
Pada konfigurasi ini, gardu induk memiliki satu busbar utama yang menghubungkan semua peralatan. Meskipun sederhana dan ekonomis, sistem ini memiliki kelemahan dalam hal keandalan; jika terjadi gangguan pada busbar, seluruh sistem dapat terpengaruh.



Gambar 2. 3 Singel Line Diagram Sistem Singel Busbar

2) Gardu Induk Sistem Double Busbar

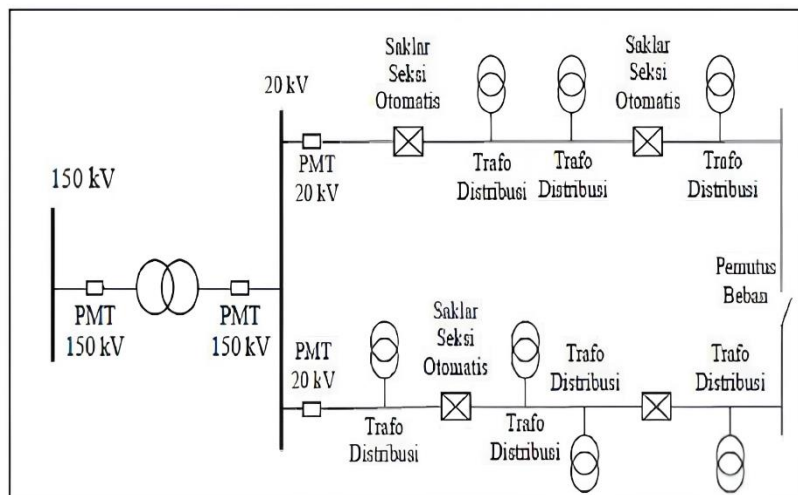
Jenis ini memiliki dua busbar yang memungkinkan fleksibilitas operasional lebih tinggi. Dengan dua busbar, peralatan dapat dialihkan antara keduanya, sehingga pemeliharaan atau gangguan pada salah satu busbar tidak mengakibatkan pemadaman total.



Gambar 2. 4 Singel Line Diagram Sistem Double Busbar

3) Gardu Induk Sistem Ring Busbar

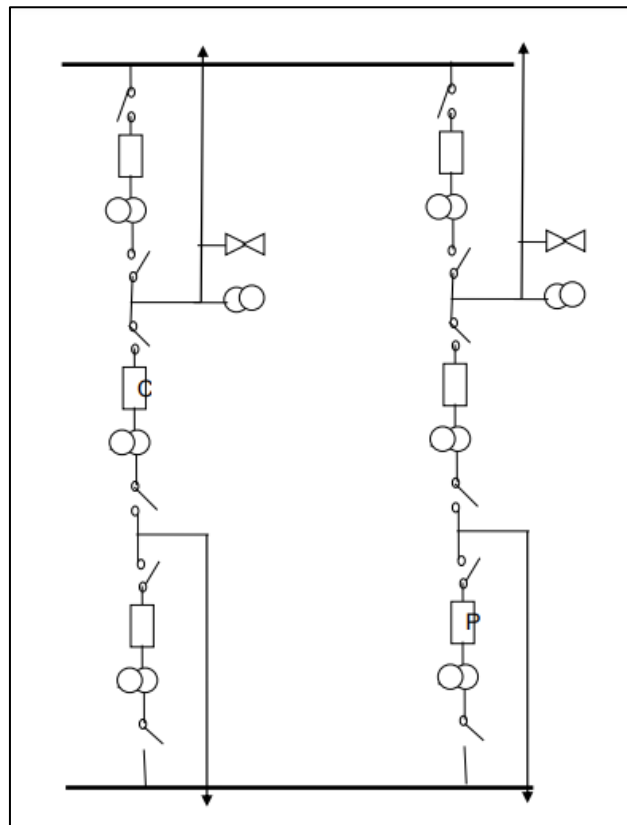
Dalam konfigurasi ini, busbar disusun membentuk cincin, di mana setiap peralatan terhubung ke dua titik pada busbar. Struktur ini meningkatkan keandalan karena aliran daya dapat dialihkan jika terjadi gangguan di salah satu segmen cincin.



Gambar 2. 5 Singel Line Diagram Sistem Ring Busbar

4) Gardu Induk Sistem Satu Setengah (*One and a Half*) Busbar

Konfigurasi ini melibatkan tiga pemutus sirkuit yang menghubungkan dua busbar dan dua saluran transmisi. Setiap dua saluran berbagi satu pemutus sirkuit, sehingga jika satu pemutus sirkuit perlu dipelihara atau mengalami gangguan, saluran lainnya tetap beroperasi. Sistem ini menawarkan keandalan tinggi dan sering digunakan di gardu induk dengan kapasitas besar.



Gambar 2. 6 *Single Line Diagram Sistem Satu Setengah Busbar*

2.2.3 Peralatan Gardu Induk

Gardu induk terdiri dari berbagai peralatan yang saling terintegrasi dan bekerja secara sinergis untuk memastikan operasionalnya berjalan dengan optimal. Berikut adalah beberapa peralatan yang berperan dalam mendukung fungsi gardu induk (Yusniati et al., 2019).

1) *Switchyard*

Switchyard merupakan area di gardu induk yang berfungsi sebagai pusat penghubung antara sistem transmisi dan distribusi listrik. Di area ini, peralatan kelistrikan penting seperti pemutus tenaga (*circuit breaker*), sakelar pemisah (*disconnecting switch*), isolator, dan busbar dipasang untuk mengatur, mengalihkan, dan mengamankan aliran listrik. Tata letaknya dirancang sedemikian rupa agar memudahkan proses pemantauan, pengoperasian, dan pemeliharaan, sekaligus menjaga keselamatan kerja dan keandalan sistem secara keseluruhan.

2) Transformator Daya

Trafo daya (*power transformer*) merupakan peralatan utama di gardu induk yang berfungsi untuk mengubah tegangan listrik dari tingkat tinggi ke tingkat menengah atau sebaliknya, sesuai kebutuhan sistem transmisi dan distribusi (Hutasuhut et al., 2017). Transformator ini memungkinkan penyaluran energi listrik dalam jumlah besar dengan efisiensi tinggi dan rugi daya yang minimal. Keberadaan trafo daya sangat krusial karena menentukan kualitas dan kontinuitas pasokan listrik ke konsumen akhir. Bentuk fisik dari trafo daya dapat dilihat pada Gambar 2.7, yang menunjukkan bagian-bagian utama dari transformator tersebut.



Gambar 2. 7 Trafo Daya

3) *Neutral Grounding Resistance (NGR)*

Tahanan pentanahan netral adalah komponen penting dalam sistem proteksi gardu induk yang berfungsi untuk membatasi arus gangguan tanah (*ground fault*) pada sistem tenaga listrik. Dengan menambahkan tahanan antara titik netral transformator dan tanah, NGR membantu mengontrol besarnya arus gangguan, mengurangi risiko kerusakan pada peralatan, serta mempermudah pendeteksian dan isolasi gangguan. Sistem pentanahan ini juga meningkatkan keselamatan operasional dengan mengurangi kemungkinan lonjakan tegangan pada peralatan saat terjadi gangguan satu fasa ke tanah.

4) Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker (CB)*

Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* adalah peralatan penting di gardu induk yang berfungsi untuk memutus dan menghubungkan aliran listrik dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan seperti arus lebih atau hubung singkat. PMT dirancang untuk bekerja secara otomatis maupun manual, guna melindungi sistem tenaga listrik dari kerusakan yang lebih besar akibat gangguan. Ketika terjadi gangguan, PMT akan memutus rangkaian dalam waktu singkat sehingga peralatan dan instalasi lainnya tetap aman.

5) Sakelar Pemisah (PMS)

Saklar pemisah atau PMS merupakan peralatan di gardu induk yang berfungsi untuk memutuskan atau menghubungkan bagian-bagian dari sistem tenaga listrik tanpa beban, artinya pemisah tidak dirancang untuk membuka atau menutup arus beban atau arus gangguan. Peran utamanya adalah memberikan isolasi visual dan fisik antara peralatan yang sedang beroperasi dengan peralatan yang sedang dipelihara atau tidak digunakan. Dengan adanya PMS, petugas dapat bekerja dengan aman karena bagian sistem yang sedang diperbaiki benar-benar terpisah dari sumber tegangan. Bentuk dari saklar pemisah ini dapat dilihat pada gambar 2.8 berikut.



Gambar 2. 8 Saklar Pemisah (PMS)

6) *Lightning Arrester (LA)*

Lightning Arrester (LA) atau penangkal petir merupakan peralatan proteksi di gardu induk yang berfungsi untuk melindungi sistem tenaga listrik dari tegangan lebih akibat sambaran petir atau switching surge. LA bekerja dengan cara mengalirkan tegangan lebih langsung ke tanah melalui sistem pentanahan, sehingga tidak merusak peralatan penting seperti transformator, PMT, dan perangkat kontrol lainnya.

LA biasanya dipasang pada sisi masuk saluran transmisi dan di dekat peralatan utama yang rentan terhadap lonjakan tegangan. Komponen ini sangat penting dalam menjaga keandalan dan kontinuitas pelayanan sistem kelistrikan, terutama pada sistem tegangan tinggi. Bentuk fisik dan konfigurasi pemasangan LA dapat dilihat pada Gambar 2.9, yang menunjukkan struktur serta posisinya dalam instalasi gardu induk.



Gambar 2. 9 Lightning Arrester (LA)

7) Transformator Arus

Trafo arus atau *Current Transformer* (CT) adalah peralatan di gardu induk yang berfungsi untuk mengukur arus listrik dalam sistem tenaga dan mentransformasikannya ke dalam nilai yang lebih kecil dan aman untuk keperluan proteksi, pengukuran, dan kontrol. CT memungkinkan pengoperasian alat proteksi seperti relai bekerja secara tepat berdasarkan arus aktual yang terjadi di jaringan, tanpa harus langsung terhubung ke arus tinggi. Selain itu, CT juga digunakan untuk pencatatan energi listrik melalui kWh meter. Desain dan letak fisik dari CT dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Transformator arus

8) Transformator Tegangan

Trafo tegangan atau *Potential Transformer* (PT) adalah peralatan yang berfungsi untuk mengubah tegangan tinggi menjadi tegangan rendah yang proporsional dan aman, guna digunakan oleh perangkat proteksi, pengukuran, dan kontrol seperti relai, kWh meter, dan sistem SCADA. Bentuk fisik dari Trafo tegangan dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Trafo tegangan

9) Transformator Pemakaian Sendiri

Transformator Pemakaian Sendiri (Trafo PS) adalah transformator yang digunakan untuk menyuplai kebutuhan listrik internal gardu induk, seperti penerangan, sistem kontrol, pemanas, dan peralatan bantu lainnya. Dengan adanya trafo ini, operasional gardu induk tetap berjalan meskipun pasokan eksternal terganggu. Bentuk trafo PS dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Trafo Pemakaian Sendiri

10) Rel Busbar (Busbar)

Rel busbar merupakan penghantar utama di gardu induk yang berfungsi untuk mengalirkan energi listrik dari satu peralatan ke peralatan lainnya, seperti dari pemutus tenaga ke transformator atau saluran transmisi. Busbar harus mampu menghantarkan arus besar secara terus-menerus tanpa mengalami pemanasan berlebih, sehingga biasanya terbuat dari bahan konduktif seperti tembaga atau aluminium. Wujud fisik dan penempatannya ditampilkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2. 13 Rel Busbar

11) Gedung Kontrol (*Control Building*)

Gedung kontrol merupakan pusat kendali operasional gardu induk, tempat diletakkannya panel kontrol, panel proteksi, dan peralatan monitoring lainnya. Gedung ini dirancang untuk memberikan lingkungan yang aman dan terkendali bagi peralatan dan personel.

12) Panel Kontrol (*Control Panel*)

Panel Kontrol berfungsi untuk memantau kondisi gardu induk dan sebagai pusat kendali lokal. Panel ini dilengkapi dengan sakelar, indikator, meter, tombol komando operasional PMT, PMS, serta alat ukur besaran listrik dan annunciator. Contoh panel control dapat dilihat pada gambar 2.14 berikut.



Gambar 2. 14 Panel Kontrol

13) Panel Proteksi (*Protection Panel*)

Panel proteksi adalah perangkat penting di gardu induk yang berfungsi untuk mendeteksi, memonitor, dan mengamankan sistem tenaga listrik dari berbagai gangguan seperti hubung singkat, arus lebih, dan gangguan tanah (Pasaribu et al., 2021). Panel ini berisi berbagai jenis relai proteksi, indikator, serta sistem kontrol yang terhubung ke peralatan utama seperti trafo, PMT, dan CT. Saat gangguan terdeteksi, panel proteksi akan mengirimkan sinyal untuk memutus aliran listrik guna mencegah kerusakan lebih lanjut

14) Sumber DC Gardu Induk (*Substation DC Supply*)

Sumber DC di gardu induk merupakan sistem catu daya yang menyediakan tegangan searah (biasanya 110 VDC atau 220 VDC) untuk keperluan operasional seperti pengoperasian pemutus tenaga, sistem proteksi, kontrol, dan komunikasi. Sistem ini terdiri dari baterai dan battery charger yang menjamin ketersediaan daya meskipun pasokan AC utama terganggu. Keandalan sumber DC sangat penting untuk menjaga fungsi otomatisasi dan keamanan gardu induk.

15) Panel AC/DC Gardu Induk

Panel AC/DC gardu induk merupakan panel distribusi yang mengatur dan menyalurkan catu daya arus bolak-balik (AC) dan arus searah (DC) ke berbagai peralatan dalam gardu induk. Panel ini menerima sumber listrik dari trafo pemakaian sendiri (untuk AC) dan dari sistem baterai serta charger (untuk DC). Panel AC/DC memastikan bahwa semua sistem proteksi, kontrol, penerangan, dan peralatan bantu lainnya mendapatkan suplai daya yang stabil dan terorganisir.

16) Kubikel 20 kV (*20 kV Cubicle*)

Kubikel 20 kV adalah panel distribusi tegangan menengah yang digunakan untuk menghubungkan dan melindungi saluran distribusi 20 kV di gardu induk. Di dalam kubikel terdapat peralatan seperti pemutus sirkit (circuit breaker), relai proteksi, dan sakelar pemisah yang dikemas dalam ruang tertutup dan terisolasi. Kubikel dirancang agar aman dioperasikan, mudah dalam perawatan, serta mampu meminimalisir risiko gangguan sistem. Kubikel ini biasanya terpasang di ruang kontrol atau distribusi. Bentuk dan konfigurasi kubikel ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2. 15 Kubikel 20 kV

17) Sistem Proteksi (*Protection System*)

Sistem proteksi di gardu induk adalah serangkaian perangkat dan mekanisme yang dirancang untuk mendeteksi gangguan dan mengambil

tindakan cepat guna melindungi peralatan serta menjaga kestabilan sistem tenaga listrik. Sistem ini terdiri dari relai proteksi, CT, PT, PMT, dan panel kontrol yang bekerja secara terintegrasi untuk mendeteksi kondisi abnormal seperti arus lebih, tegangan lebih, gangguan tanah, dan hubung singkat. Saat gangguan terdeteksi, sistem proteksi akan mengirimkan perintah pemutusan ke pemutus tenaga guna mencegah kerusakan lanjutan.

2.2.4 Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB)

Berdasarkan IEV (*International Electrotechnical Vocabulary*) 441-14-20 disebutkan bahwa *Circuit Breaker* (CB) atau Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan saklar/switching mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam kondisi abnormal/gangguan seperti kondisi hubung singkat (*short circuit*).

Sedangkan definisi PMT berdasarkan IEEE C37.100:1992 (*Standard definitions for power switchgear*) adalah merupakan peralatan saklar/switching mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal sesuai dengan ratingnya serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal/gangguan sesuai dengan ratingnya.

Fungsi utamanya adalah sebagai alat pembuka atau penutup suatu rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta mampu membuka atau menutup saat terjadi arus gangguan (hubung singkat) pada jaringan atau peralatann lain.

1. Klasifikasi PMT

Pemutus tenaga dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori berdasarkan berbagai aspek teknis, antara lain berdasarkan tegangan nominal, jumlah mekanisme penggerak, jenis media isolasi yang digunakan, serta

metode pemadaman busur api, khususnya yang menggunakan gas SF₆. Masing-masing klasifikasi ini memiliki karakteristik dan penerapan yang berbeda sesuai dengan kebutuhan operasional dalam sistem tenaga listrik.

1) Berdasarkan Besar/Kelas Tegangan

Pemutus tenaga (PMT) dapat diklasifikasikan berdasarkan tingkat tegangan operasionalnya, yaitu dengan mengelompokkan jenis-jenis PMT sesuai dengan rentang tegangan yang digunakan dalam sistem tenaga listrik. Klasifikasi ini mencakup PMT tegangan rendah, tegangan menengah, dan tegangan tinggi, yang masing-masing dirancang untuk memenuhi kebutuhan proteksi dan pemutusan arus sesuai karakteristik sistem tempat PMT tersebut dioperasikan, seperti yang akan dijelaskan di bawah ini:

a) PMT Tegangan Rendah (*Low Voltage*)

Merupakan jenis pemutus tenaga yang dirancang untuk beroperasi pada rentang tegangan antara 0,1 kV hingga 1 kV, sesuai dengan standar SPLN 1.1995 – 3.3.

b) PMT Tegangan Menengah (*Medium Voltage*)

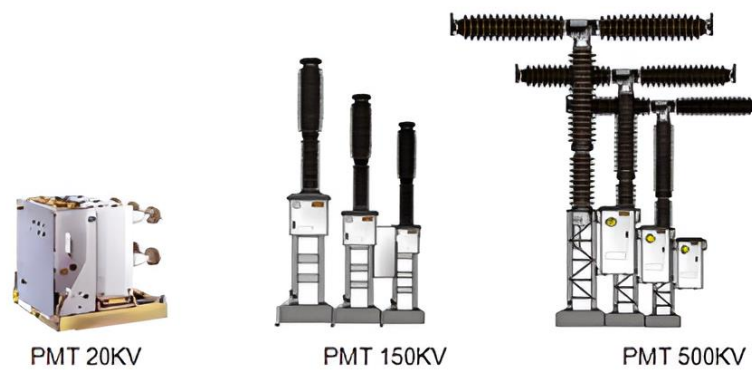
Kategori ini mencakup pemutus tenaga yang berfungsi dalam sistem dengan tegangan berkisar antara 1 kV hingga 35 kV, sebagaimana diatur dalam standar SPLN 1.1995 – 3.4.

c) PMT Tegangan Tinggi (*High Voltage*)

Jenis pemutus tenaga ini digunakan pada jaringan tenaga listrik yang beroperasi dalam rentang tegangan 35 kV hingga 245 kV, mengacu pada SPLN 1.1995 – 3.5.

d) PMT Tegangan Ekstra Tinggi (*Extra High Voltage*)

Diperuntukkan bagi sistem tenaga listrik dengan tegangan di atas 245 kV AC, sesuai dengan ketentuan dalam SPLN 1.1995 – 3.6.



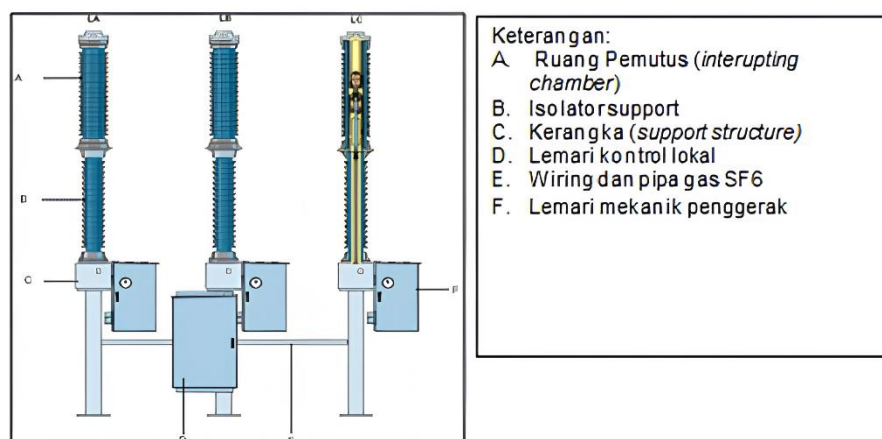
Gambar 2. 16 *Macam – Macam PMT*

2) Berdasarkan Jumlah Mekanik Penggerak / *Tripping Coil*

Berdasarkan jumlah mekanisme penggerak atau tripping coil yang digunakan, pemutus tenaga (PMT) dapat diklasifikasikan ke dalam 2 jenis, yaitu:

a) *PMT Single Pole*

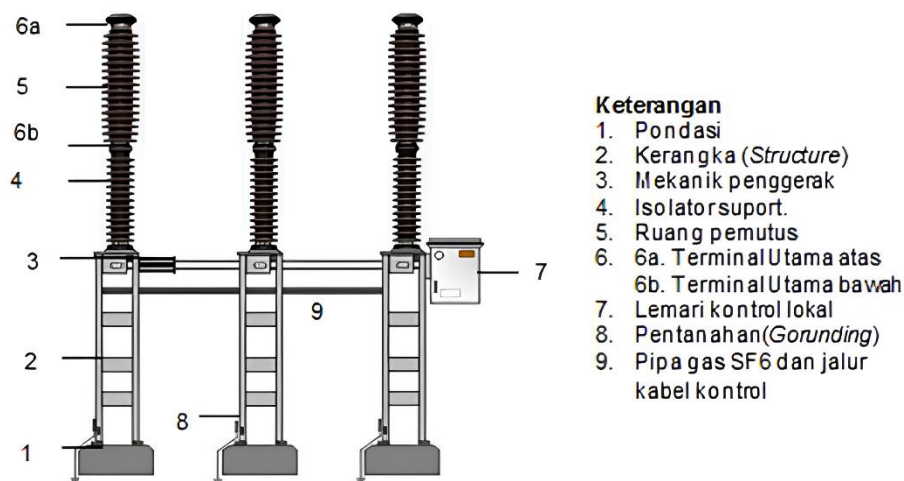
Jenis PMT ini dilengkapi dengan mekanisme penggerak terpisah pada setiap pole-nya. Umumnya, PMT dengan konfigurasi ini dipasang pada bay penghantar untuk memungkinkan proses pemulihan kembali (*reclosing*) pada satu fasa secara independen,



Gambar 2. 17 *PMT Singel Pole*

b) PMT Three Pole

PMT tipe ini dilengkapi dengan satu mekanisme penggerak yang berfungsi untuk mengoperasikan ketiga fasa secara bersamaan, memastikan koneksi yang sinkron antar fasa. Sistem ini juga didukung oleh kopel mekanik guna meningkatkan kestabilan operasi. Umumnya, jenis PMT ini digunakan pada bay transformator, bay kopel, serta pada jaringan distribusi 20 kV



Gambar 2. 18 PMT Three Pole

3) Berdasarkan Media Isolasi

a) PMT Gas SF6

PMT jenis ini menggunakan gas sulfur heksafluorida (SF6) sebagai media isolasi dan pemadam busur api. Gas SF6 memiliki sifat dielektrik yang sangat baik, mampu menahan tegangan tinggi, serta efektif dalam memadamkan busur api dengan cepat. PMT SF6 umumnya digunakan dalam sistem tegangan tinggi dan ekstra tinggi karena keandalannya dalam operasi serta kemampuannya menjaga stabilitas sistem tenaga listrik.

b) PMT Minyak

PMT ini menggunakan minyak isolasi sebagai media pemadam busur api. Minyak berfungsi sebagai pendingin sekaligus isolator, di mana saat terjadi pemutusan arus, minyak akan menguap akibat panas dari busur api, membentuk gelembung gas yang membantu memadamkan busur tersebut. Meskipun memiliki kemampuan pemadaman yang baik, pemutus tenaga berbasis minyak cenderung membutuhkan pemeliharaan lebih intensif dan memiliki risiko kebakaran yang lebih tinggi dibandingkan jenis lainnya.

Terdapat 2 jenis PMT berdasakan jumlah penggunaan minyaknya, yaitu :

- CB/PMT dengan Volume Minyak Besar (*Bulk Oil Circuit Breaker*), Jenis pemutus tenaga ini menggunakan minyak dalam jumlah besar sebagai media pemadam busur api sekaligus isolator untuk mencegah hubungan listrik antara bagian bertegangan dan struktur eksternal.
- CB/PMT dengan Volume Minyak Terbatas (*Low Oil Content Circuit Breaker*), Pada tipe ini, minyak hanya digunakan untuk meredam busur api, sedangkan fungsi isolasi mengandalkan material seperti porselen atau bahan organik khusus.

c) PMT Udara Hembus (*Air Blast*)

Jenis PMT ini memanfaatkan aliran udara bertekanan tinggi untuk memadamkan busur api yang terbentuk saat pemutusan arus listrik. Udara bertekanan diarahkan ke titik busur api untuk mendinginkan dan memutus jalur konduksi, sehingga pemadaman dapat berlangsung secara cepat dan efektif. PMT udara hembus sering digunakan dalam sistem tegangan tinggi karena kecepatan operasinya yang tinggi dan kemampuannya dalam mengurangi keausan pada kontak pemutus.

d) PMT Hampa Udara (*Vacum*)

PMT hampa udara bekerja dengan cara mengisolasi kontak pemutus dalam ruang vakum, sehingga busur api yang terjadi saat pemutusan arus dapat dipadamkan dengan cepat akibat absennya medium penghantar. Jenis ini dikenal memiliki daya tahan tinggi, tidak memerlukan banyak perawatan, serta sangat efektif dalam memadamkan busur api, terutama pada sistem tegangan menengah. Selain itu, karena tidak menggunakan gas atau minyak, PMT ini lebih ramah lingkungan dan memiliki umur operasional yang lebih panjang.

4) Berdasarkan Proses Pemadaman Busur Api Listrik Diruang Pemutus

PMT SF₆ dapat dikategorikan menjadi dua jenis berdasarkan mekanisme pemadaman busur api yang terjadi di dalam ruang pemutus, yaitu:

a) PMT Jenis Tekanan Tunggal (*single pressure type*)

Jenis PMT ini menggunakan gas SF₆ bertekanan sekitar 5 kg/cm², di mana selama proses pemisahan kontak, gas mengalami tekanan tinggi (*thermal overpressure*) dan dialirkan ke dalam silinder yang terhubung dengan kontak bergerak. Saat pemutusan terjadi, gas SF₆ diarahkan melalui nozzle untuk menghasilkan hembusan yang efektif dalam memadamkan busur api.

b) PMT Jenis Tekanan Ganda (*double pressure type*)

Pada tipe ini, PMT menggunakan sistem tekanan tinggi sekitar 12 kg/cm² dan sistem tekanan rendah sekitar 2 kg/cm². Selama pemutusan arus, gas SF₆ dari sistem tekanan tinggi dialirkan melalui nozzle ke sistem tekanan rendah, lalu dipompakan kembali ke sistem tekanan tinggi untuk digunakan kembali. Namun, karena perkembangan teknologi, jenis PMT ini sudah tidak lagi diproduksi secara komersial.

2. Komponen Pada PMT serta Fungsinya

Sistem Pemutus Tenaga (PMT) terdiri dari berbagai sub-sistem yang mencakup sejumlah komponen, di mana setiap komponen memiliki fungsi spesifik. Pembagian serta penentuan fungsi komponen tersebut dapat dilihat sebagai berikut:

1) *Primary*

Bagian ini merupakan komponen konduktif dalam PMT yang berperan dalam menyalurkan energi listrik dengan tingkat rugi daya yang minimal serta memiliki kemampuan untuk menghubungkan atau memutus arus beban baik dalam kondisi operasi normal maupun saat terjadi gangguan.

a) *Interrupter*

Merupakan bagian terjadinya proses membuka atau menutup kontak PMT. Didalamnya terdapat beberapa jenis kontak yang berkenaan langsung dalam proses penutupan atau pemutusan arus,

b) *Aksesoris dari interrupter*

Terdiri dari resistor yang dipasang secara paralel dengan unit pemutus utama dan hanya beroperasi saat proses penutupan kontak PMT berlangsung, serta kapasitor yang dipasang paralel dengan tahanan, unit pemutus utama, dan unit pemutus pembantu.

c) *Terminal utama*

Bagian dari PMT yang merupakan titik sambungan/koneksi antara PMT dengan konduktor luar dan berfungsi untuk mengalirkan arus dari atau ke konduktor luar.

2) *Dielectric*

Berfungsi sebagai Isolasi peralatan dan memadamkan busur api dengan sempurna pada saat moving contact bekerja.

a) *Electrical Insulation* (Isolator)

Pemutus Tenaga (PMT) memiliki dua jenis isolasi utama yang berfungsi sebagai isolator, yaitu Isolator Ruang Pemutus (*Interrupting Chamber*) dan Isolator Penyangga (*Isolator Support*).

b) Media Pemadam Busur Api

Berperan sebagai media untuk memadamkan busur api yang muncul selama proses pembukaan atau penutupan PMT saat beroperasi.

3) *Driving Mechanism*

Bagian ini berperan dalam menyimpan energi yang diperlukan untuk menggerakkan kontak bergerak (*moving contact*) pada PMT dalam jangka waktu tertentu sesuai dengan spesifikasinya. PMT memiliki beberapa jenis sistem penggerak, di antaranya:

a) Penggerak pegas (*Spring Drive*)

Mekanisme penggerak PMT yang menggunakan pegas terdiri dari dua jenis, yaitu pegas pilin (*helical spring*) dan pegas gulung (*scroll spring*).

b) Penggerak Hidrolik

Penggerak mekanik PMT hidrolik adalah rangkaian gabungan dari beberapa komponen mekanik, elektrik dan hidrolik oil yang dirangkai sedemikian rupa sehingga dapat berfungsi sebagai penggerak untuk membuka dan menutup PMT.

c) Penggerak Pneumatic

Penggerak mekanik PMT pneumatic adalah rangkaian gabungan dari beberapa komponen mekanik, elektrik dan udara bertekanan yang dirangkai sedemikian rupa sehingga dapat berfungsi sebagai penggerak untuk membuka dan menutup PMT.

d) 4 SF6 Gas Dynamic

PMT jenis ini memanfaatkan tekanan gas SF6 yang memiliki fungsi ganda, yakni sebagai media pemadam busur api sekaligus sebagai sumber tenaga untuk mekanisme penggerak. Setiap PMT terdiri dari tiga pole identik, di mana masing-masing merupakan unit yang mencakup interrupter, isolator tumpu, dan power actuator yang digerakkan oleh tekanan gas SF6 dalam siklus tertutup. Pergerakan kontak utama terjadi akibat adanya perbedaan tekanan gas SF6, yang menghasilkan energi untuk mengoperasikan mekanisme pemutusan arus.

4) Secondary

Sub-sistem sekunder berperan dalam mengirimkan sinyal kontrol atau pemicu untuk mengoperasikan sub-sistem mekanik pada momen yang tepat. Komponen yang membentuk sub-sistem sekunder meliputi:

a) Lemari Mekanik/Kontrol

Berfungsi untuk melindungi peralatan tegangan rendah dan sebagai tempat secondary equipment.

b) Terminal Dan Wiring Control

Sebagai terminal wiring kontrol PMT serta memberikan trigger pada mekanik penggerak untuk operasi PMT.

2.2.5 Tahanan Kontak pada PMT

Tahanan kontak adalah resistansi yang terjadi pada titik-titik sambungan atau kontak dalam PMT. Nilai tahanan kontak yang tinggi dapat disebabkan oleh faktor seperti korosi, keausan mekanis, atau pemasangan yang tidak tepat.

Tahanan kontak yang meningkat dapat menyebabkan panas berlebih, penurunan efisiensi, dan potensi kerusakan pada peralatan. Oleh karena itu,

pengukuran dan pemantauan tahanan kontak secara berkala sangat penting untuk memastikan kinerja optimal PMT.

Untuk memastikan PMT berfungsi dengan baik, pengujian tahanan kontak dilakukan sesuai dengan standar internasional seperti IEC 60694, yang menetapkan bahwa nilai tahanan kontak tidak boleh melebihi $100\ \mu\Omega$ atau 120% dari nilai Factory Acceptance Test (FAT).

Pengujian ini biasanya dilakukan menggunakan alat seperti Micro-Ohmmeter, yang mampu mengukur resistansi dengan akurasi tinggi. Pengujian rutin dan pemeliharaan preventif diperlukan untuk mendeteksi dan mengatasi peningkatan tahanan kontak sebelum menyebabkan masalah serius.

2.2.6 Rugi Daya pada PMT

Rugi-rugi daya (*power loss*) adalah kebocoran daya atau daya yang hilang di sepanjang jalur penyaluran tenaga listrik, hal ini disebabkan oleh resistansi yang ada pada bahan pembentuk konduktor (Irsyam et al., 2023).

Dalam sistem tenaga listrik, power loss ini merupakan fenomena yang tak terhindarkan, terutama pada komponen-komponen seperti Pemutus Tenaga (PMT). Salah satu sumber utama rugi daya pada PMT adalah tahanan kontak yang terjadi pada titik-titik sambungan listrik. Tahanan kontak ini dapat menyebabkan peningkatan suhu lokal akibat efek Joule, yang selanjutnya berpotensi mempercepat degradasi material kontak dan menurunkan efisiensi operasional PMT (Irsyam et al., 2023).

Pertemuan dari beberapa konduktor menyebabkan suatu hambatan terhadap arus yang melaluinya sehingga akan terjadi panas dan menjadikan kerugian teknis. Rugi ini sangat signifikan jika nilai tahanan kontakannya tinggi. Batasan nilai tahanan kontak PMT berdasarkan standart IEC 60694 nilai $R \leq 100\ \mu\Omega / 120\ \% \text{ Nilai FAT}$ (Susanto et al., 2021).

Untuk menghitung rugi daya akibat tahanan kontak, digunakan rumus dasar:

$$P_{loss} = I^2 \times R \dots\dots\dots (1)$$

di mana:

- P_{loss} = Rugi daya (Watt)
- I^2 = Arus listrik yang mengalir (Ampere)
- R = Tahanan kontak (Ohm)

Dari persamaan tersebut, terlihat bahwa rugi daya memiliki hubungan kuadratik terhadap arus yang mengalir, sehingga semakin besar arus yang melewati PMT, semakin tinggi pula rugi daya yang dihasilkan. Oleh karena itu, pemantauan dan pemeliharaan rutin terhadap kondisi kontak pada PMT sangat penting untuk memastikan efisiensi dan keandalan sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai tahanan kontak antara lain usia PMT, kondisi mekanis, dan kebersihan permukaan kontak. Kontak yang aus atau kotor dapat meningkatkan tahanan kontak, sehingga meningkatkan rugi daya. Pemeliharaan rutin dan pengujian tahanan kontak diperlukan untuk memastikan PMT beroperasi dalam kondisi optimal.

Untuk mengurangi rugi daya pada PMT, disarankan untuk melakukan pemeliharaan preventif secara berkala, termasuk pembersihan kontak dan penggantian komponen yang aus. Penggunaan teknologi pengukuran tahanan kontak dinamis (*Dynamic Contact Resistance Measurement*) juga dapat membantu dalam mendeteksi dan mencegah peningkatan tahanan kontak sebelum menyebabkan kerusakan serius.

BAB III METODOLOGI

3.1 Waktu Dan Tempat Penelitian

Dalam pelaksanaan Penelitian ini, pengambilan data dilakukan di PT. PLN (Persero) UPT Medan Gardu Induk 150 kV Glugur Jalan KL. Yos Sudarso Lor. 12 Medan. Kota Medan, Sumatra Utara. Penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan April 2025 dengan rincian waktu pelaksanaan penelitian tersebut dapat dilihat pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3. 1 Waktu Pelaksanaan Penelitian

No	Uraian	Bulan Ke							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Kajian literatur								
2	Penyusunan proposal penelitian								
3	Penulisan Bab 1 sampai 3								
4	Seminar Proposal								
5	Penelitian dan pengambilan data								
6	Analisa Data								
7	Seminar hasil								
8	Sidang akhir								

3.2 Bahan Dan Alat

Dalam penelitian ini, terdapat berbagai bahan dan peralatan yang digunakan untuk menganalisis serta mengolah data terkait tahanan kontak pada Pemutus Tenaga (PMT). Adapun bahan dan alat yang digunakan meliputi:

3.2.1 Pemutus Tenaga (PMT)

Objek utama dalam penelitian ini adalah Pemutus Tenaga (PMT) tegangan tinggi dengan kapasitas 150 kV yang terpasang di Gardu Induk Glugur. Penelitian difokuskan pada pengukuran tahanan kontak pada PMT yang terdapat di beberapa bay (saluran), dengan tujuan untuk mengetahui besarnya resistansi yang terjadi akibat sambungan-sambungan pada kontak tetap dan kontak bergerak di dalam PMT. Hasil pengukuran ini menjadi dasar dalam analisis rugi daya dan susut energi.

Data nameplate PMT di Gardu Induk Glugur

1. Bay Trafo Daya 1

Bay ini merupakan jalur yang menghubungkan sisi 150 kV ke trafo daya 1 yang berfungsi mentransformasikan tegangan tinggi menjadi tegangan menengah. Data nameplate PMT bay trafo daya 1 dapat dilihat pada tabel 3.2 di bawah ini:

Tabel 3. 2 Nameplate PMT Bay Trafo Daya 1

Merek/Tipe	Sprecher Energie /BHG 114
Nomor Seri / Tahun	1987/2126143/6
Tegangan Nominal	150/170 kV
Arus Nominal	2000 A
Arus Termal	40 kA selama 1 detik
Arus Dinamis	100 kA
Arus Pemutusan	31.5 kA
Urutan Operasi	o-0.3s-co-3min-co
Tekanan Operasi (Pe)	6.2 bar @ 20°C (saat pengisian)
Tekanan Minimum operasi	5.5 bar @ 20°C (saat beroperasi)

2. Bay Trafo Daya 2

Bay ini merupakan jalur yang menghubungkan sisi 150 kV ke trafo daya 2 yang berfungsi mentransformasikan tegangan tinggi menjadi tegangan menengah. Data nameplate PMT bay trafo daya 2 dapat dilihat pada tabel 3.3 di bawah ini:

Tabel 3. 3 Nameplate PMT Bay Trafo Daya 2

Merek/Tipe	Sprecher Energie /BHG 114
Nomor Seri / Tahun	1987/2126143/12
Tegangan Nominal	150/170 kV
Arus Nominal	2000 A
Arus Termal	40 kA selama 1 detik
Arus Dinamis	100 kA
Arus Pemutusan	31.5 kA
Urutan Operasi	o-0.3s-co-3min-co
Tekanan Operasi (Pe)	6.2 bar @ 20°C (saat pengisian)
Tekanan Minimum operasi	5.5 bar @ 20°C (saat beroperasi)

3. Bay Trafo Daya 3

Bay ini merupakan jalur yang menghubungkan sisi 150 kV ke trafo daya 3 yang berfungsi mentransformasikan tegangan tinggi menjadi tegangan menengah. Data nameplate PMT bay trafo daya 3 dapat dilihat pada tabel 3.4 di bawah ini:

Tabel 3. 4 Nameplate PMT Bay Trafo Daya 3

Merek/Tipe	ALSTOM /BHG 114
Nomor Seri	2012/43850-0010/3
Tegangan Nominal (U)	150/170 kV, 50 Hz
Arus Nominal (I)	2000 A
Arus Termal (Ith)	40 kA selama 1 detik
Arus Dinamis (Idyn)	100 kA
Urutan Operasi	o-0.3s-CO-3min-CO
Tekanan Maksimal (Pmm)	6.2 bar @ 20°C (saat pengisian)
Tekanan Minimum Operasi (Pmn)	5.5 bar @ 20°C (saat beroperasi)

4. Bay Penghantar Glugur-P.Geli 1

Bay penghantar Glugur-P.Geli 1 berfungsi sebagai sistem penghubung dan pemutus aliran tegangan listrik pada jaringan transmisi yang mengalir dari Gardu Induk Glugur menuju Gardu Induk Paya Geli. Data nameplate PMT bay Penghantar Glugur-P.Geli 1 dapat dilihat pada tabel 3.5 di bawah ini:

Tabel 3. 5 Nameplate PMT Bay Penghantar Glugur-P.Geli 1

Merek/Tipe	Sprecher Energie /BHG 114
Nomor Seri / Tahun	1987/2126143/12
Tegangan Nominal	150/170 kV
Arus Nominal	2000 A
Arus Termal	40 kA selama 1 detik
Arus Dinamis	100 kA
Arus Pemutusan	31.5 kA
Urutan Operasi	o-0.3s-co-3min-co
Tekanan Operasi (Pe)	6.2 bar @ 20°C (saat pengisian)
Tekanan Minimum operasi	5.5 bar @ 20°C (saat beroperasi)

5. Bay Penghantar Glugur-P.Geli 2

Bay penghantar Glugur-P.Geli 2 berfungsi sebagai sistem penghubung dan pemutus aliran tegangan listrik pada jaringan transmisi yang mengalir dari Gardu Induk Glugur menuju Gardu Induk Paya Geli. Data nameplate PMT bay Penghantar Glugur-P.Geli 2 dapat dilihat pada tabel 3.6 di bawah ini:

Tabel 3. 6 Nameplate PMT Bay Penghantar Glugur-P.Geli 2

Merek/Tipe	Sprecher Energie /BHG 114
Nomor Seri / Tahun	1987/2126143/15
Tegangan Nominal	150/170 kV
Arus Nominal	2000 A
Arus Termal	40 kA selama 1 detik
Arus Dinamis	100 kA

Arus Pemutusan	31.5 kA
Urutan Operasi	o-0.3s-co-3min-co
Tekanan Operasi (Pe)	6.2 bar @ 20°C (saat pengisian)
Tekanan Minimum operasi	5.5 bar @ 20°C (saat beroperasi)

3.2.2 Laptop

Laptop digunakan sebagai perangkat utama dalam penyusunan laporan skripsi serta untuk merangkum, mengolah, dan menganalisis data hasil observasi. Selain itu, laptop juga berfungsi sebagai media dalam mengoperasikan perangkat lunak yang mendukung penelitian.



Gambar 3. 1 Laptop

3.2.3 Kalkulator

Kalkulator diperlukan untuk melakukan perhitungan hasil pengukuran data guna memastikan keakuratan nilai yang diperoleh dalam analisis tahanan kontak, sehingga hasil yang dihasilkan lebih presisi dan dapat dipertanggungjawabkan.



Gambar 3. 2 Kalkulator

3.2.4 Alat Ukur Tahanan Kontak

Perangkat utama dalam pengukuran tahanan kontak pada PMT adalah Micro Ohm Meter, yaitu alat ukur yang berfungsi untuk menentukan nilai tahanan kontak dengan prinsip kerja yang serupa dengan pengukuran tahanan murni (R_{dc}). Proses pengukuran dilakukan dengan mengalirkan arus listrik searah (DC) sebesar 100 Ampere pada kontak tertutup atau sambungan, kemudian tegangan yang dihasilkan diukur untuk menentukan nilai tahanan kontak berdasarkan persamaan $R = V / I$.



Gambar 3. 3 Micro Ohm Meter

3.2.5 Software

Perangkat lunak digunakan sebagai alat bantu dalam penelitian, pengolahan data, serta penyusunan tugas akhir. Beberapa perangkat lunak yang digunakan antara lain:

- Microsoft Word : Digunakan untuk menyusun laporan penelitian dan skripsi.
- Microsoft Excel : Berfungsi untuk mengolah dan menganalisis data hasil pengukuran.
- Microsoft Power Point : Dimanfaatkan dalam penyusunan presentasi hasil penelitian agar dapat disampaikan secara lebih sistematis dan profesional.

3.2.6 Alat Ukur Keserempakan Kontak

Alat ukur keserempakan kontak digunakan untuk mengetahui selisih waktu operasi antar fasa (R, S, T) pada pemutus tenaga (PMT) saat proses buka (*open*) maupun tutup (*close*). Alat ini sangat penting untuk memastikan bahwa ketiga fasa bekerja secara serentak sesuai dengan standar operasi yang telah ditentukan. Salah satu alat yang umum digunakan adalah Circuit Breaker Analyzer yang dilengkapi dengan sensor waktu presisi tinggi.

Alat ini bekerja dengan cara mendeteksi sinyal awal pergerakan kontak (*break time*) hingga mencapai posisi akhir (*fully open atau fully closed*) pada setiap fasa. Data yang terekam akan dianalisis untuk menentukan selisih waktu antar fasa, yang kemudian digunakan sebagai dasar evaluasi keserempakan kontak pada PMT.



Gambar 3. 4 Circuit Breaker Analyzer

3.3 Prosedur Pengujian Tahanan Kontak

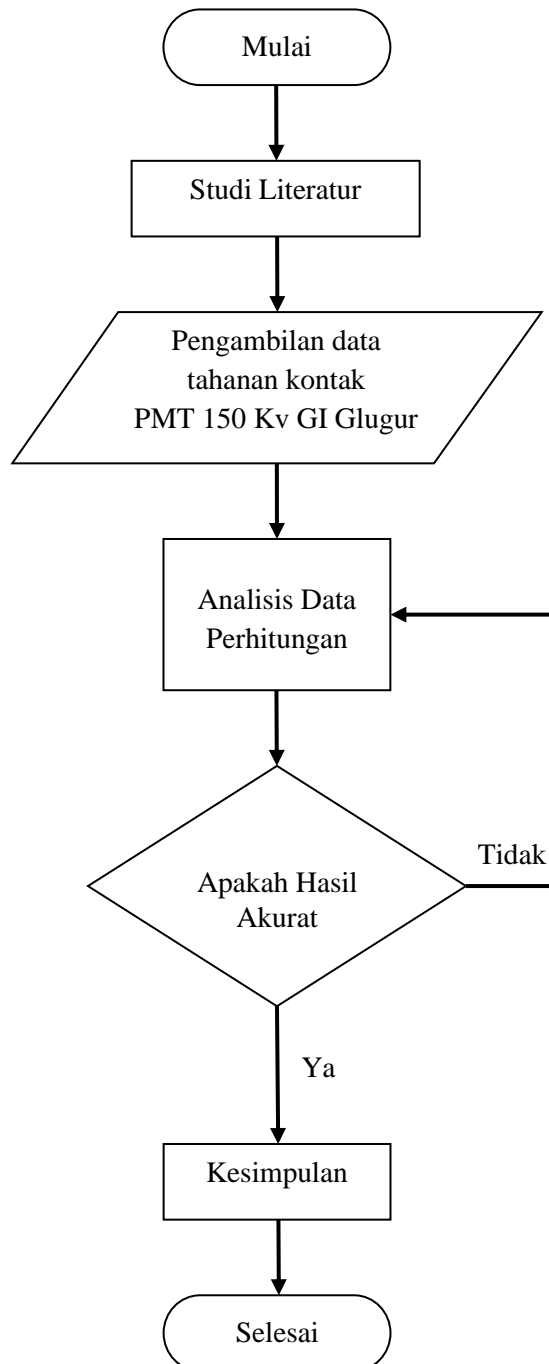
Metode penelitian yang diterapkan dilakukan melalui observasi serta pengumpulan data hasil pengujian tahanan kontak pada PMT, yang dilakukan saat kegiatan pemeliharaan dua tahunan di Gardu Induk Glugur. Adapun langkah-langkah dalam pengujian tahanan kontak, yaitu:

5. Pasang kabel injeksi arus dari port kabel hitam besar dan kabel voltage sense warna hitam dari peralatan uji ke terminal bagian bawah PMT.
6. Hubungkan kabel power ke suplai daya 220 VAC.
7. Nyalakan alat uji tombol Power ke posisi ON.
8. Pilih arus pengujian yang digunakan : 100 A dan/atau 200 A dan/atau 300 A dengan menekan tombol keypad arah.
9. Tekan keypad Ω untuk memulai pengujian sampai muncul tulisan “READY”.
10. Tekan “ENTER”.
11. Hasil tes akan tampil setelah beberapa detik, catat hasil pengukuran di form pemeliharaan yang telah disiapkan dan ulangi dengan arus pengujian yang lain.
12. Matikan alat uji, posisikan tombol power ke posisi “OFF”. 13. Lepaskan semua kabel rangkaian pengujian.

Dengan mengikuti langkah-langkah tersebut secara sistematis, pengujian tahanan kontak pada PMT dapat dilakukan dengan aman dan akurat. Hasil pengujian yang tercatat menjadi dasar evaluasi kondisi koneksi listrik pada pemutus tenaga, sehingga potensi kerugian energi akibat tahanan yang tinggi dapat diminimalkan. Pengujian ini penting dilakukan secara berkala sebagai bagian dari program pemeliharaan preventif untuk memastikan keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

3.4 Bagan Alir Penelitian

Diagram alir penelitian dalam penelitian ini ditunjukkan pada gambar *flowchart* dibawah ini.



Gambar 3. 6 *Flowchart Penelitian*

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Tahanan Kontak

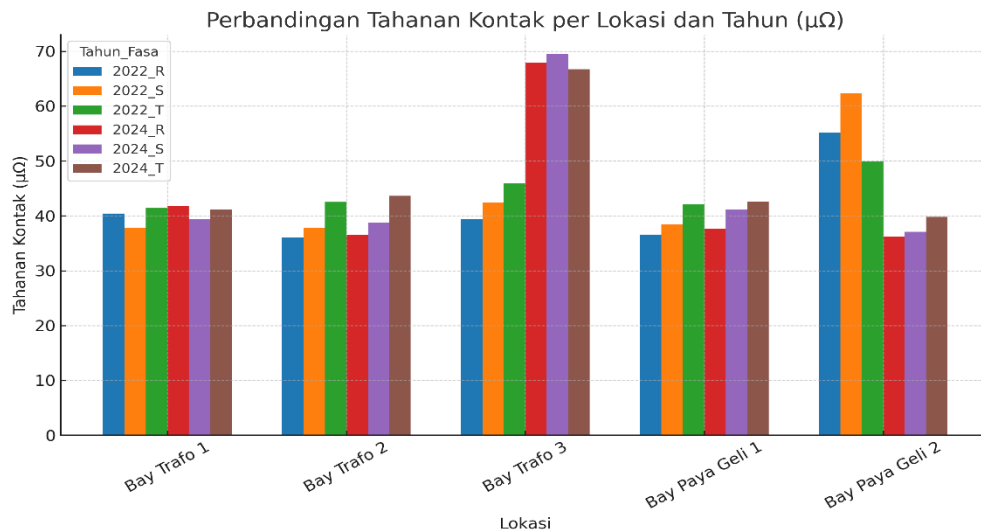
Pengujian tahanan kontak dilakukan pada Pemutus Tenaga (PMT) 150 kV yang berada di Gardu Induk Glugur. Objek penelitian meliputi lima bay yaitu Bay Trafo 1, Bay Trafo 2, Bay Trafo 3, Bay Paya Geli 1, dan Bay Paya Geli 2. Setiap PMT diuji pada ketiga fasa (R, S, T) menggunakan Micro Ohm Meter sesuai prosedur yang dijelaskan pada Bab III. Data pengujian diperoleh pada dua periode pemeliharaan, yaitu tahun 2022 dan 2024, sehingga memungkinkan adanya perbandingan nilai tahanan kontak antar tahun.

Tahanan kontak merupakan nilai resistansi yang terdapat pada pemutus tenaga (PMT), yang timbul akibat adanya titik-titik sambungan antara konduktor, baik pada kontak tetap (*fixed contact*) maupun kontak bergerak (*moving contact*). Nilai tahanan kontak setiap PMT dapat berbeda-beda tergantung pada kondisi fisik dan kualitas sambungan internalnya. Berikut ini merupakan tabel 4.1 yaitu data tahanan kontak dari 5 Pemutus tenaga yang terdapat pada Gardu Induk Glugur.

Tabel 4. 1 Data Tahanan Kontak

No	Lokasi	Tahanan Kontak ($\mu\Omega$) pada Tahun					
		2022			2024		
		R	S	T	R	S	T
1	Bay Trafo 1	40.4	37.8	41.4	41.8	39.4	41.2
2	Bay Trafo 2	36.1	37.8	42.5	36.5	38.8	43.6
3	Bay Trafo 3	39.4	42.4	45.9	67.9	67.5	66.7
4	Bay Paya Geli 1	36.6	38.4	42.1	37.7	41.2	42.6
5	Bay Paya Geli 2	55.1	62.3	49.9	36.2	37.1	39.8

Untuk mempermudah pengamatan perbedaan nilai tahanan kontak, data pada Tabel 4.1 divisualisasikan dalam grafik pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4. 1 Grafik Perbandingan Tahanan Kontak

Dari tabel 4.1 dan grafik 4.1, dapat dilihat bahwa secara umum nilai tahanan kontak mengalami peningkatan di sebagian besar bay, terutama pada Bay Trafo 3, yang menunjukkan kenaikan signifikan di semua fasa. Rata-rata kenaikan pada bay ini adalah lebih dari $24 \mu\Omega$, dengan fasa R meningkat hingga $+28.5 \mu\Omega$. Hal ini mengindikasikan bahwa terjadi kenaikan tahanan kontak yang cukup tinggi.

Faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya tahanan kontak yang tinggi diantaranya adalah karena kontak utama PMT tidak terhubung sempurna karena mekanik tidak bekerja dengan baik, permukaan kontak utama cacat/aus akibat gesekan pada saat PMT beroperasi, atau permukaan terminal kotor akibat flashover.

Kondisi ini sejalan dengan temuan pada penelitian ini, di mana peningkatan tahanan kontak pada Bay Trafo disebabkan oleh keausan mekanik, yang terjadi akibat frekuensi switching yang lebih tinggi dibandingkan dengan PMT pada bay yang lain.

Sebaliknya, Bay Paya Geli 2 justru mengalami penurunan nilai tahanan kontak yang cukup signifikan. Fasa S, misalnya, turun dari $62.3 \mu\Omega$ menjadi $37.1 \mu\Omega$ ($\Delta -25.2 \mu\Omega$). Penurunan ini dapat disebabkan oleh pelaksanaan

pemeliharaan, seperti pembersihan kontak atau pengencangan ulang sambungan mekanis, yang berhasil mengembalikan kualitas koneksi antar penghantar.

Untuk memahami lebih rinci perubahan nilai tahanan kontak, berikut disajikan analisis per lokasi bay yang terjadi antara tahun 2022 dan 2024.

- 1) Bay Trafo 1 mengalami kenaikan ringan pada fasa R dan S, namun fasa T sedikit menurun. Hal ini mencerminkan perubahan yang masih dalam batas normal akibat waktu dan pemakaian.
- 2) Bay Trafo 2 menunjukkan pola kenaikan moderat dan seragam pada ketiga fasa, yang kemungkinan disebabkan oleh efek umur peralatan.
- 3) Bay Trafo 3 menjadi perhatian utama karena kenaikan nilai tahanan yang tajam, melebihi $20 \mu\Omega$, dan mendekati ambang batas atas operasional. Ini dapat mengindikasikan perlunya inspeksi menyeluruh dan tindakan korektif.
- 4) Bay Paya Geli 1 juga mengalami peningkatan kecil hingga sedang, namun masih dalam rentang normal.
- 5) Bay Paya Geli 2 merupakan satu-satunya bay yang mengalami penurunan, yang menunjukkan kemungkinan keberhasilan pemeliharaan teknis di lokasi tersebut.

4.1.1 Perhitungan Rugi Daya Penghantar

Setiap pemutus tenaga memiliki nilai tahanan kontak yang bervariasi. Arus listrik mengalir melalui pemutus tenaga, dan perbedaan nilai tersebut dipengaruhi oleh besar kecilnya beban yang terhubung pada saluran pemutus tenaga.

Masing-masing pemutus tenaga memiliki nilai yang berbeda-beda tergantung pada besar beban yang terhubung pada salurannya. Berikut ini adalah data arus pada setiap pemutus tenaga di Gardu Induk Glugur yang ditampilkan pada tabel 4.2

Tabel 4. 2 Data Arus

No	Lokasi	Nilai Arus (A)
1	Bay Trafo 1	185
2	Bay Trafo 2	184
3	Bay Trafo 3	201
4	Bay Paya Geli 1	270
5	Bay Paya Geli 2	284

1) Rugi daya pada PMT bay penghantar TD-1 (2022)

Rata-rata tahanan kontak saat diinjeksi 100 A, 200 A, dan 300 A. Arus yang diperoleh pada pembacaan arus di panel kontrol.

$$R = 40,4 \mu\Omega$$

$$S = 37,8 \mu\Omega$$

$$T = 41,4 \mu\Omega$$

$$I = 185 \text{ A}$$

Maka,

$$\text{Ploss fasa R} = (185)^2 \times (40,4 \times 10^{-6} \Omega) = 1,38 \text{ w} = 0,00138 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa S} = (185)^2 \times (37,8 \times 10^{-6} \Omega) = 1,29 \text{ w} = 0,00129 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa T} = (185)^2 \times (41,4 \times 10^{-6} \Omega) = 1,42 \text{ w} = 0,00142 \text{ kw}$$

2) Rugi daya pada PMT bay penghantar TD-1 tahun 2024

Rata-rata tahanan kontak saat diinjeksi 100 A, 200 A, dan 300 A. Arus yang diperoleh pada pembacaan arus di panel kontrol.

$$R = 41,8 \mu\Omega$$

$$S = 39,4 \mu\Omega$$

$$T = 41,2 \mu\Omega$$

$$I = 185 \text{ A}$$

Maka,

$$\text{Ploss fasa R} = (185)^2 \times (41,8 \times 10^{-6} \Omega) = 1,43 \text{ w} = 0,00143 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa S} = (185)^2 \times (39,4 \times 10^{-6} \Omega) = 1,35 \text{ w} = 0,00135 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa T} = (185)^2 \times (41,2 \times 10^{-6} \Omega) = 1,41 \text{ w} = 0,00141 \text{ kw}$$

3) Rugi daya pada PMT bay penghantar TD-2 tahun 2022

Rata-rata tahanan kontak saat diinjeksi 100 A, 200 A, dan 300 A. Arus yang diperoleh pada pembacaan arus di panel kontrol.

$$R = 36,1 \mu\Omega$$

$$S = 37,8 \mu\Omega$$

$$T = 42,5 \mu\Omega$$

$$I = 184 \text{ A}$$

Maka,

$$\text{Ploss fasa R} = (184)^2 \times (36,1 \times 10^{-6} \Omega) = 1,22 \text{ w} = 0,00122 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa S} = (184)^2 \times (37,8 \times 10^{-6} \Omega) = 1,28 \text{ w} = 0,00128 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa T} = (184)^2 \times (42,5 \times 10^{-6} \Omega) = 1,43 \text{ w} = 0,00143 \text{ kw}$$

4) Rugi daya pada PMT bay penghantar TD-2 tahun 2024

Rata-rata tahanan kontak saat diinjeksi 100 A, 200 A, dan 300 A. Arus yang diperoleh pada pembacaan arus di panel kontrol.

$$R = 36,5 \mu\Omega$$

$$S = 38,8 \mu\Omega$$

$$T = 43,6 \mu\Omega$$

$$I = 184 \text{ A}$$

Maka,

$$\text{Ploss fasa R} = (184)^2 \times (36,5 \times 10^{-6} \Omega) = 1,24 \text{ w} = 0,00124 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa S} = (184)^2 \times (38,8 \times 10^{-6} \Omega) = 1,31 \text{ w} = 0,00131 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa T} = (184)^2 \times (43,6 \times 10^{-6} \Omega) = 1,48 \text{ w} = 0,00148 \text{ kw}$$

5) Rugi daya pada PMT bay penghantar TD-3 tahun 2022

Rata-rata tahanan kontak saat diinjeksi 100 A, 200 A, dan 300 A. Arus yang diperoleh pada pembacaan arus di panel kontrol.

$$R = 39,4 \mu\Omega$$

$$S = 42,4 \mu\Omega$$

$$T = 45,9 \mu\Omega$$

$$I = 201 \text{ A}$$

Maka,

$$\text{Ploss fasa R} = (201)^2 \times (39,4 \times 10^{-6} \Omega) = 1,59 \text{ w} = 0,00159 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa S} = (201)^2 \times (42,4 \times 10^{-6} \Omega) = 1,71 \text{ w} = 0,00171 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa T} = (201)^2 \times (45,9 \times 10^{-6} \Omega) = 1,85 \text{ w} = 0,00185 \text{ kw}$$

6) Rugi daya pada PMT bay penghantar TD-3 tahun 2024

Rata-rata tahanan kontak saat diinjeksi 100 A, 200 A, dan 300 A. Arus yang diperoleh pada pembacaan arus di panel kontrol.

$$R = 67,9 \mu\Omega$$

$$S = 67,5 \mu\Omega$$

$$T = 66,7 \mu\Omega$$

$$I = 201 \text{ A}$$

Maka,

$$\text{Ploss fasa R} = (201)^2 \times (67,9 \times 10^{-6} \Omega) = 2,74 \text{ w} = 0,00274 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa S} = (201)^2 \times (67,5 \times 10^{-6} \Omega) = 2,73 \text{ w} = 0,00273 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa T} = (201)^2 \times (66,7 \times 10^{-6} \Omega) = 2,69 \text{ w} = 0,00269 \text{ kw}$$

7) Rugi daya pada PMT bay penghantar Glugur-P.Geli 1 tahun 2022

Rata-rata tahanan kontak saat diinjeksi 100 A, 200 A, dan 300 A. Arus yang diperoleh pada pembacaan arus di panel kontrol.

$$R = 36,6 \mu\Omega$$

$$S = 38,4 \mu\Omega$$

$$T = 42,1 \mu\Omega$$

$$I = 270 \text{ A}$$

Maka,

$$\text{Ploss fasa R} = (270)^2 \times (36,6 \times 10^{-6} \Omega) = 2,66 \text{ w} = 0,00266 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa S} = (270)^2 \times (38,4 \times 10^{-6} \Omega) = 2,79 \text{ w} = 0,00279 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa T} = (270)^2 \times (42,1 \times 10^{-6} \Omega) = 3,07 \text{ w} = 0,00307 \text{ kw}$$

8) Rugi daya pada PMT bay penghantar Glugur-P.Geli 1 tahun 2024

Rata-rata tahanan kontak saat diinjeksi 100 A, 200 A, dan 300 A. Arus yang diperoleh pada pembacaan arus di panel kontrol.

$$R = 37,7 \mu\Omega$$

$$S = 41,2 \mu\Omega$$

$$T = 42,6 \mu\Omega$$

$$I = 270 \text{ A}$$

Maka,

$$\text{Ploss fasa R} = (270)^2 \times (37,7 \times 10^{-6} \Omega) = 2,75 \text{ w} = 0,00275 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa S} = (270)^2 \times (41,2 \times 10^{-6} \Omega) = 3,01 \text{ w} = 0,00301 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa T} = (270)^2 \times (42,6 \times 10^{-6} \Omega) = 3,11 \text{ w} = 0,00311 \text{ kw}$$

9) Rugi daya pada PMT bay penghantar Glugur-P.Geli 2 tahun 2022

Rata-rata tahanan kontak saat diinjeksi 100 A, 200 A, dan 300 A. Arus yang diperoleh pada pembacaan arus di panel kontrol.

$$R = 55,1 \mu\Omega$$

$$S = 62,3 \mu\Omega$$

$$T = 49,9 \mu\Omega$$

$$I = 284 \text{ A}$$

Maka,

$$\text{Ploss fasa R} = (284)^2 \times (55,1 \times 10^{-6} \Omega) = 4,44 \text{ w} = 0,00444 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa S} = (284)^2 \times (62,3 \times 10^{-6} \Omega) = 5,02 \text{ w} = 0,00502 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa T} = (284)^2 \times (49,9 \times 10^{-6} \Omega) = 4,02 \text{ w} = 0,00402 \text{ kw}$$

10) Rugi daya pada PMT bay penghantar Glugur-P.Geli 2 tahun 2024

Rata-rata tahanan kontak saat diinjeksi 100 A, 200 A, dan 300 A. Arus yang diperoleh pada pembacaan arus di panel kontrol.

$$R = 36,2 \mu\Omega$$

$$S = 37,1 \mu\Omega$$

$$T = 39,8 \mu\Omega$$

$$I = 284 \text{ A}$$

Maka,

$$\text{Ploss fasa R} = (284)^2 \times (36,2 \times 10^{-6} \Omega) = 2,92 \text{ w} = 0,00292 \text{ kw}$$

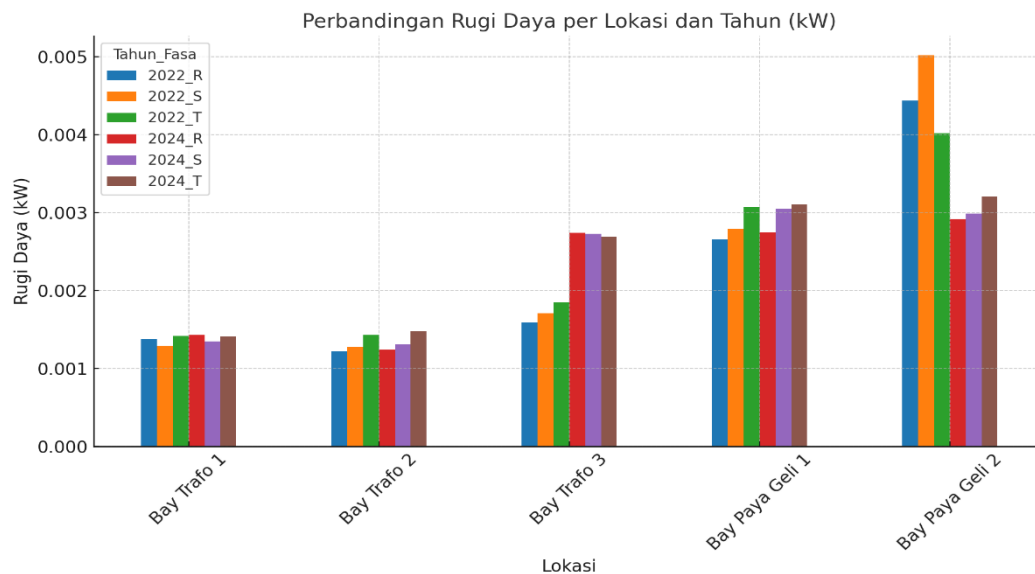
$$\text{Ploss fasa S} = (284)^2 \times (37,1 \times 10^{-6} \Omega) = 2,99 \text{ w} = 0,00299 \text{ kw}$$

$$\text{Ploss fasa T} = (284)^2 \times (39,8 \times 10^{-6} \Omega) = 3,21 \text{ w} = 0,00321 \text{ kw}$$

Tabel 4. 3 Hasil perhitungan rugi daya

No	Lokasi	Rugi Daya Pada Tahun (kW)					
		2022			2024		
		R	S	T	R	S	T
1	Bay Trafo 1	0,00138	0,00129	0,00142	0,00143	0,00135	0,00141
2	Bay Trafo 2	0,00122	0,00128	0,00143	0,00124	0,00131	0,00148
3	Bay Trafo 3	0,00159	0,00171	0,00185	0,00274	0,00273	0,00269
4	Bay Paya Geli 1	0,00266	0,00279	0,00307	0,00275	0,00301	0,00311
5	Bay Paya Geli 2	0,00444	0,00502	0,00402	0,00292	0,00299	0,00321

Untuk mempermudah dalam mengamati perbedaan nilai rugi daya antar bay dan antar tahun, hasil perhitungan pada tabel 4.3 kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Grafik Perbandingan Rugi Daya

Berdasarkan tabel 4.3 dan grafik 4.2 hasil perhitungan rugi daya diatas, dapat disimpulkan bahwa setiap pemutus tenaga pada masing-masing bay memiliki nilai tahanan kontak yang tidak sama. Perbedaan ini berdampak pada besarnya rugi daya yang terjadi, semakin tinggi nilai tahanan kontak, maka semakin besar pula rugi dayanya.

Selain itu, arus yang mengalir melalui penghantar turut memengaruhi rugi daya; semakin besar arusnya, semakin besar rugi daya yang ditimbulkan. Letak pemutus tenaga juga berkontribusi terhadap perbedaan rugi daya karena setiap lokasi memiliki beban yang berbeda, sehingga arus yang mengalir pun bervariasi.

4.1.2 Perhitungan susut energi listrik

Setelah mengetahui rugi daya, maka susut energi listrik dapat dihitung dengan stimasi kehilangan energi listrik pada setiap titik kontak yang diasumsikan dengan waktu selama 1 bulan atau 720 jam ($30 \text{ hari} \times 24 \text{ jam} = 720 \text{ jam}$). Besarnya energi listrik yang hilang ditentukan menggunakan rumus berikut:

$$W_{loss} = P_{loss} \times t \dots\dots\dots(2)$$

Dimana:

W_{loss} = Energi listrik yang hilang (kWh)

P_{loss} = Rugi daya (kW)

t = Waktu (jam)

1) Susut energi pada PMT bay Trafo Daya 1 tahun 2022

P_{loss} fasa R = 0,00138 kw

P_{loss} fasa S = 0,00129 kw

P_{loss} fasa T = 0,00142 kw

Maka,

W_{loss} fasa R = 0,00138 kw x 720 jam = 0,9936 kWh

W_{loss} fasa S = 0,00129 kw x 720 jam = 0,9288 kWh

W_{loss} fasa T = 0,00142 kw x 720 jam = 1,0224 kWh

2) Susut energi pada PMT bay Trafo Daya 1 tahun 2024

P_{loss} fasa R = 0,00143 kw

P_{loss} fasa S = 0,00135 kw

P_{loss} fasa T = 0,00141 kw

Maka,

W_{loss} fasa R = 0,00143 kw x 720 jam = 1,0296 kWh

W_{loss} fasa S = 0,00135 kw x 720 jam = 0,972 kWh

W_{loss} fasa T = 0,00141 kw x 720 jam = 1,0152 kWh

3) Susut energi pada PMT bay Trafo Daya 2 tahun 2022

P_{loss} fasa R = 0,00122 kw

P_{loss} fasa S = 0,00128 kw

P_{loss} fasa T = 0,00143 kw

Maka,

$$W_{\text{loss fasa R}} = 0,00122 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 0,8784 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa S}} = 0,00128 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 0,9216 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa T}} = 0,00143 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 1,0296 \text{ kWh}$$

4) Susut energi pada PMT bay Trafo Daya 2 tahun 2024

$$P_{\text{loss fasa R}} = 0,00124 \text{ kw}$$

$$P_{\text{loss fasa S}} = 0,00131 \text{ kw}$$

$$P_{\text{loss fasa T}} = 0,00148 \text{ kw}$$

Maka,

$$W_{\text{loss fasa R}} = 0,00124 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 0,8928 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa S}} = 0,00131 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 0,9432 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa T}} = 0,00148 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 1,0656 \text{ kWh}$$

5) Susut energi pada PMT bay Trafo Daya 3 tahun 2022

$$P_{\text{loss fasa R}} = 0,00159 \text{ kw}$$

$$P_{\text{loss fasa S}} = 0,00171 \text{ kw}$$

$$P_{\text{loss fasa T}} = 0,00185 \text{ kw}$$

Maka,

$$W_{\text{loss fasa R}} = 0,00159 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 1,1448 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa S}} = 0,00171 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 1,2312 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa T}} = 0,00185 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 1,332 \text{ kWh}$$

6) Susut energi pada PMT bay Trafo Daya 3 tahun 2024

$$P_{\text{loss fasa R}} = 0,00274 \text{ kw}$$

$$P_{\text{loss fasa S}} = 0,00273 \text{ kw}$$

$$P_{\text{loss fasa T}} = 0,00269 \text{ kw}$$

Maka,

$$W_{\text{loss fasa R}} = 0,00274 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 1,9728 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa S}} = 0,00273 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 1,9656 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa T}} = 0,00269 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 1,9368 \text{ kWh}$$

7) Susut energi pada PMT bay Paya-Geli 1 tahun 2022

$$P_{\text{loss fasa R}} = 0,00266 \text{ kw}$$

$$P_{\text{loss fasa S}} = 0,00279 \text{ kw}$$

$$P_{\text{loss fasa T}} = 0,00307 \text{ kw}$$

Maka,

$$W_{\text{loss fasa R}} = 0,00266 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 1,9152 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa S}} = 0,00279 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 2,0088 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa T}} = 0,00307 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 2,2104 \text{ kWh}$$

8) Susut energi pada PMT bay Paya-Geli 1 tahun 2024

$$P_{\text{loss fasa R}} = 0,00275 \text{ kw}$$

$$P_{\text{loss fasa S}} = 0,00301 \text{ kw}$$

$$P_{\text{loss fasa T}} = 0,00311 \text{ kw}$$

Maka,

$$W_{\text{loss fasa R}} = 0,00275 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 1,9815 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa S}} = 0,00301 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 2,1672 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa T}} = 0,00311 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 2,2392 \text{ kWh}$$

9) Susut energi pada PMT bay Paya-Geli 2 tahun 2022

$$P_{\text{loss fasa R}} = 0,00444 \text{ kw}$$

$$P_{\text{loss fasa S}} = 0,00502 \text{ kw}$$

$$P_{\text{loss fasa T}} = 0,00402 \text{ kw}$$

Maka,

$$W_{\text{loss fasa R}} = 0,00444 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 3,1968 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa S}} = 0,00502 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 3,6144 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa T}} = 0,00402 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 2,8944 \text{ kWh}$$

10) Susut energi pada PMT bay Paya-Geli 2 tahun 2024

$$P_{\text{loss fasa R}} = 0,00292 \text{ kw}$$

$$P_{\text{loss fasa S}} = 0,00299 \text{ kw}$$

$$P_{\text{loss fasa T}} = 0,00321 \text{ kw}$$

Maka,

$$W_{\text{loss fasa R}} = 0,00292 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 2,1024 \text{ kWh}$$

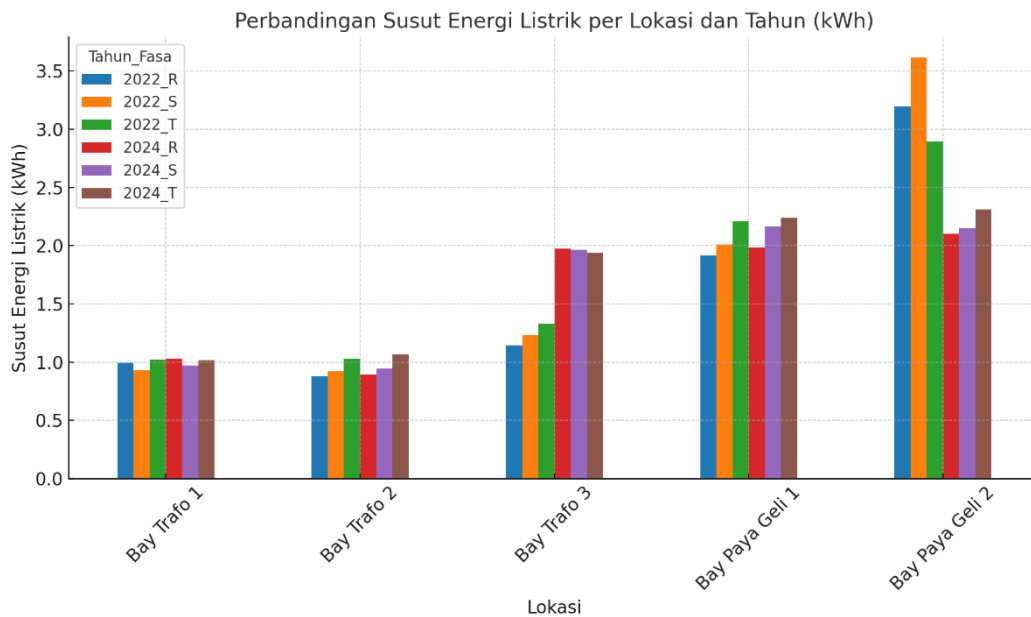
$$W_{\text{loss fasa S}} = 0,00299 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 2,1528 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa T}} = 0,00321 \text{ kw} \times 720 \text{ jam} = 2,3112 \text{ kWh}$$

Tabel 4. 4 Hasil perhitungan susut energi listrik

No	Lokasi	Energi Listrik yang Hilang Pada Tahun (kWh)					
		2022			2024		
		R	S	T	R	S	T
1	Bay Trafo 1	0,9936	0,9288	1,0224	1,0296	0,972	1,0152
2	Bay Trafo 2	0,8784	0,9216	1,0296	0,8928	0,9432	1,0656
3	Bay Trafo 3	1,1448	1,2312	1,332	1,9728	1,9656	1,9368
4	Bay Paya Geli 1	1,9152	2,0088	2,2104	1,9815	2,1672	2,2392
5	Bay Paya Geli 2	3,1968	3,6144	2,8944	2,1024	2,1528	2,3112

Untuk memperjelas hasil perhitungan susut energi listrik yang telah ditampilkan pada Tabel 4.4, data tersebut divisualisasikan kembali dalam bentuk grafik pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Grafik Hasil Perhitungan Susut Energi

Berdasarkan tabel 4.4 dan grafik 4.3 hasil perhitungan susut energi diatas, dapat dianalisis bahwa jumlah energi listrik yang hilang dipengaruhi oleh besar kecilnya rugi daya pada masing-masing pemutus tenaga. Semakin tinggi rugi dayanya, maka semakin besar pula energi yang hilang. Asumsi waktu yang digunakan membantu menyederhanakan proses perhitungan, karena seluruh pemutus tenaga diasumsikan bekerja dalam durasi waktu yang sama. Lokasi pemutus tenaga juga berpengaruh terhadap nilai kehilangan energi listrik, sebab setiap lokasi memiliki arus yang berbeda-beda. Semakin besar arus yang mengalir, maka semakin besar pula energi listrik yang hilang

4.1.3 Perhitungan biaya listrik

Perhitungan biaya listrik dilakukan untuk mengetahui jumlah pengeluaran berdasarkan energi listrik yang hilang. Energi yang hilang diasumsikan terjadi selama 1 bulan, sehingga biaya yang dihitung merupakan biaya dari kehilangan energi listrik dalam periode tersebut. Tarif listrik yang digunakan sebagai dasar perhitungan diambil dari data resmi PLN, seperti pada tabel 4.5 berikut.

Tabel 4. 5 Tarif Dasar Listrik

No	Golongan Daya / Pelanggan	Tarif (Rp/kWh)
1	Rumah Tangga Subsidi 450 VA	415
2	Rumah Tangga Subsidi 900 VA	605
3	Rumah Tangga Non-Subsidi 900 VA RTM	1352
4	Rumah Tangga Non-Subsidi 1.300 VA & 2.200 VA	1444,7
5	Rumah Tangga Menengah 3.500–5.500 VA	1699,53
6	Rumah Tangga Besar ≥ 6.600 VA	1699,53
7	Bisnis B-2 (6.600 VA–200 kVA)	1444,7
8	Bisnis B-3 / Industri Menengah (≥ 200 kVA)	1114,74
9	Industri Menengah (I-3, > 200 kVA)	1114,74
10	Industri Besar (I-4, > 30.000 kVA)	996,74
11	Pemerintah P-1 (6.600 VA–200 kVA)	1699,53
12	Jalan Umum P-3	1699,53

Dalam perhitungan biaya rugi daya akibat tahanan kontak pada pemutus tenaga (PMT) di Gardu Induk Glugur, digunakan tarif dasar listrik sebesar Rp 1.699,53 per kWh. Tarif ini dipilih karena mewakili golongan tarif untuk pelanggan rumah tangga besar (≥ 6.600 VA), bisnis, dan fasilitas umum yang menggunakan daya menengah hingga tinggi, yang umumnya mendekati karakteristik beban pada sistem tenaga listrik di gardu induk. Pemilihan tarif ini bertujuan untuk memberikan estimasi biaya rugi daya yang relevan dan representatif terhadap kondisi aktual sistem transmisi 150 kV, di mana rugi daya yang terjadi dapat memberikan dampak finansial signifikan apabila tidak dikendalikan dengan baik. Perhitungan biaya listrik dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{Biaya} = W_{\text{loss}} \times \text{Rp } 1.699,53 / \text{kWh} \dots \dots \dots (3)$$

Dengan,

Biaya = Biaya yang harus dibayar (Rp)

W_{loss} = Energi listrik yang hilang (kWh)

1) Biaya listrik yang hilang pada PMT bay Trafo Daya 1 tahun 2022

$$W_{\text{loss fasa R}} = 0,9936 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa S}} = 0,9288 \text{ kwh}$$

$$W_{\text{loss fasa T}} = 1,0224 \text{ kwh}$$

Maka,

$$\text{Biaya fasa R} = 0,9936 \text{ kWh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 1.688,65$$

$$\text{Biaya fasa S} = 0,9288 \text{ kwh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 1.578,52$$

$$\text{Biaya fasa T} = 1,0224 \text{ kwh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 1.737,77$$

2) Biaya listrik yang hilang PMT bay Trafo Daya 1 tahun 2024

$$W_{\text{loss fasa R}} = 1,0296 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa S}} = 0,972 \text{ kwh}$$

$$W_{\text{loss fasa T}} = 1,0152 \text{ kwh}$$

Maka,

$$\text{Biaya fasa R} = 1,0296 \text{ kWh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 1749,84$$

$$\text{Biaya fasa S} = 0,972 \text{ kwh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 1651,94$$

$$\text{Biaya fasa T} = 1,0152 \text{ kwh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 1725,36$$

3) Biaya listrik yang hilang PMT bay Trafo Daya 2 tahun 2022

$$W_{\text{loss fasa R}} = 0,8784 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{loss fasa S}} = 0,9216 \text{ kwh}$$

$$W_{\text{loss fasa T}} = 1,0296 \text{ kwh}$$

Maka,

$$\text{Biaya fasa R} = 0,8784 \text{ kWh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 1492,86$$

$$\text{Biaya fasa S} = 0,9216 \text{ kwh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 1566,29$$

$$\text{Biaya fasa T} = 1,0296 \text{ kwh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 1749,84$$

4) Biaya listrik yang hilang pada PMT bay Trafo Daya 2 tahun 2024

$$W_{\text{loss fasa R}} = 0,8928 \text{ kWh}$$

Wloss fasa S = 0,9432 kwh

Wloss fasa T = 1,0656 kwh

Maka,

Biaya fasa R = 0,8928 kWh x Rp 1.699,53 = Rp 1517,34

Biaya fasa S = 0,9432 kwh x Rp 1.699,53 = Rp 1602,99

Biaya fasa T = 1,0656 kwh x Rp 1.699,53 = Rp 1811,02

5) Biaya listrik yang hilang pada PMT bay Trafo Daya 3 tahun 2022

Wloss fasa R = 1,1448 kWh

Wloss fasa S = 1,2312 kwh

Wloss fasa T = 1,332 kwh

Maka,

Biaya fasa R = 1,1448 kWh x Rp 1.699,53 = Rp 1945,62

Biaya fasa S = 1,2312 kwh x Rp 1.699,53 = Rp 2092,46

Biaya fasa T = 1,332 kwh x Rp 1.699,53 = Rp 2263,77

6) Biaya listrik yang hilang pada PMT bay Trafo Daya 3 tahun 2024

Wloss fasa R = 1,9728 kWh

Wloss fasa S = 1,9656 kwh

Wloss fasa T = 1,9368 kwh

Maka,

Biaya fasa R = 1,9728 kWh x Rp 1.699,53 = Rp 3352,83

Biaya fasa S = 1,9656 kwh x Rp 1.699,53 = Rp 3340,59

Biaya fasa T = 1,9368 kwh x Rp 1.699,53 = Rp 3291,65

7) Biaya listrik yang hilang pada PMT bay paya-geli 1 tahun 2022

Wloss fasa R = 1,9152 kWh

Wloss fasa S = 2,0088 kwh

Wloss fasa T = 2,2104 kwh

Maka,

$$\text{Biaya fasa R} = 1,9152 \text{ kWh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 3254,94$$

$$\text{Biaya fasa S} = 2,0088 \text{ kwh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 3414,02$$

$$\text{Biaya fasa T} = 2,2104 \text{ kwh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 3756,64$$

8) Biaya listrik yang hilang pada PMT bay paya-geli 1 tahun 2024

$$\text{Wloss fasa R} = 1,9815 \text{ kWh}$$

$$\text{Wloss fasa S} = 2,1672 \text{ kwh}$$

$$\text{Wloss fasa T} = 2,2392 \text{ kwh}$$

Maka,

$$\text{Biaya fasa R} = 1,9815 \text{ kWh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 3367,62$$

$$\text{Biaya fasa S} = 2,1672 \text{ kwh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 3683,22$$

$$\text{Biaya fasa T} = 2,2392 \text{ kwh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 3805,58$$

9) Biaya listrik yang hilang pada PMT bay paya-geli 2 tahun 2022

$$\text{Wloss fasa R} = 3,1968 \text{ kWh}$$

$$\text{Wloss fasa S} = 3,6144 \text{ kwh}$$

$$\text{Wloss fasa T} = 2,8944 \text{ kwh}$$

Maka,

$$\text{Biaya fasa R} = 3,1968 \text{ kWh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 5433,06$$

$$\text{Biaya fasa S} = 3,6144 \text{ kwh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 6142,78$$

$$\text{Biaya fasa T} = 2,8944 \text{ kwh} \times \text{Rp } 1.699,53 = \text{Rp } 4919,12$$

10) Biaya listrik yang hilang pada PMT bay paya-geli 2 tahun 2024

$$\text{Wloss fasa R} = 2,1024 \text{ kWh}$$

$$\text{Wloss fasa S} = 2,1528 \text{ kwh}$$

$$\text{Wloss fasa T} = 2,3112 \text{ kwh}$$

Maka,

Biaya fasa R = 2,1024 kWh x Rp 1.699,53 = Rp 3573,09

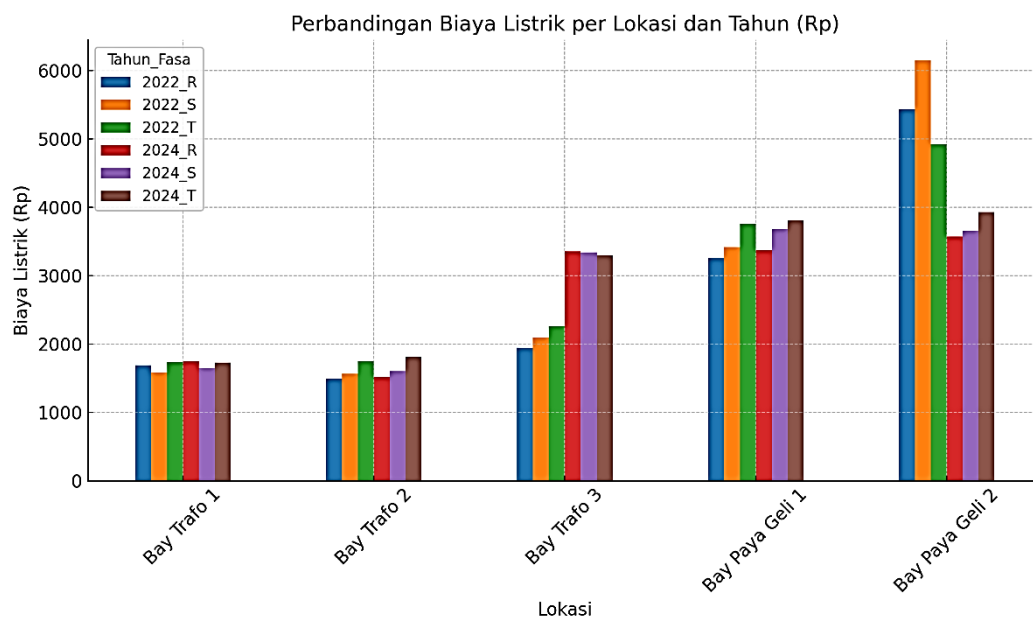
Biaya fasa S = 2,1528 kwh x Rp 1.699,53 = Rp 3658,75

Biaya fasa T = 2,3112 kwh x Rp 1.699,53 = Rp 3927,95

Tabel 4. 6 Hasil perhitungan biaya listrik selama 1 bulan

No	Lokasi	Biaya Listrik yang Hilang Pada Tahun (Rp)					
		2022			2024		
		R	S	T	R	S	T
1	Bay Trafo 1	1688,65	1578,52	1737,56	1749,83	1651,94	1725,36
2	Bay Trafo 2	1492,86	1566,28	1749,83	1517,34	1602,99	1811,01
3	Bay Trafo 3	1945,62	2092,46	2263,77	3352,83	3340,59	3291,64
4	Bay Paya Geli 1	3254,93	3414,01	3756,64	3367,61	3683,22	3805,58
5	Bay Paya Geli 2	5433,06	6142,78	4919,12	3573,092	3658,74	3927,95

Untuk memperjelas besarnya kerugian biaya listrik akibat rugi daya yang dihitung selama satu bulan, hasil perhitungan pada Tabel 4.6 ditampilkan kembali dalam bentuk grafik pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Grafik Hasil Perhitungan Biaya Listrik

Berdasarkan tabel 4.6 dan grafik 4.4, menunjukkan bahwa setiap pemutus tenaga memiliki nilai biaya listrik yang berbeda-beda, tergantung pada besarnya energi yang hilang. Semakin besar susut energi, semakin tinggi pula biaya listrik yang harus dibayar. Biaya tertinggi terjadi di Bay Paya Geli 2 fasa S tahun 2022 sebesar Rp 6.142,78, sedangkan biaya terendah terdapat di Bay Trafo 2 fasa R tahun 2022 sebesar Rp 1.492,86. Perbedaan ini dipengaruhi oleh variasi susut energi listrik tiap lokasi dan tahun.

4.2 Pengujian Keserempakan Kontak

Pengujian keserempakan kontak pada pemutus tenaga (PMT) bertujuan untuk mengetahui apakah ketiga fasa (R, S, dan T) bekerja secara serentak saat dilakukan operasi buka (*open*) dan tutup (*close*). Ketidaksesuaian waktu antar fasa dapat menyebabkan ketidakseimbangan sistem dan berpotensi menimbulkan kerusakan pada peralatan.

Berdasarkan SPLN 52-1:1984 (Standar Perusahaan Listrik Negara), nilai ambang batas waktu operasi PMT yang diizinkan adalah waktu buka (*open*) ≤ 35 milidetik (ms), waktu tutup (*close*) ≤ 130 ms, dan keserempakan antar fasa maksimal ≤ 10 ms. Untuk memastikan kinerja tersebut, pengujian dibagi menjadi dua bagian, yaitu pengujian keserempakan saat pembukaan (*open*) dan saat penutupan (*close*), yang akan dijelaskan dalam subbab berikut.

4.2.1 Pengujian Keserempakan Open

Pengujian keserempakan open bertujuan untuk memastikan bahwa ketiga fasa pada pemutus tenaga (PMT) dapat membuka secara serentak saat terjadi gangguan. Ketidaksesuaian waktu pembukaan antar fasa dapat menimbulkan ketidakseimbangan sistem dan mengganggu stabilitas operasi jaringan. Dalam pengujiannya, PMT dialiri tegangan normal dan dipicu untuk membuka secara otomatis. Proses ini memantau pergerakan awal kontak (*break time*) hingga posisi terbuka penuh (*fully open position*) pada setiap fasa.

Selisih waktu antara fasa tercepat dan terlambat menjadi indikator utama keserempakan. Semakin kecil selisih tersebut, semakin baik performa PMT dalam menjaga kestabilan sistem. Hasil pengujian keserempakan open untuk beberapa bay dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Data Pengujian Waktu Open

No	Lokasi	Waktu Open (ms)		
		R	S	T
1	Bay Trafo 1	27,5	27,5	27,6
2	Bay Trafo 2	28,6	27,5	27,5
3	Bay Trafo 3	37,4	37,2	37,4
4	Bay Paya Geli 1	27,5	27,6	27,1
5	Bay Paya Geli 2	28	27,6	27,8

Dari hasil pengujian waktu open pada lima bay di GI Glugur sebagaimana disajikan pada Tabel 4.7, diperoleh nilai waktu buka kontak berada dalam rentang 23,6 ms hingga 37,4 ms. Nilai waktu terkecil tercatat pada Bay Trafo 2 sebesar 23,6 ms (fasa R), sedangkan nilai tertinggi terdapat pada Bay Trafo 3 sebesar 37,4 ms pada seluruh fasa. Rata-rata waktu open pada Bay Trafo 1, Bay Paya Geli 1, dan Bay Paya Geli 2 berada di kisaran 27,5 ms hingga 28,0 ms, yang menunjukkan keserempakan yang baik antar fasa. Selisih waktu antar fasa di tiap bay akan dihitung secara matematis untuk mendapatkan nilai keserempakan kontak, sebagaimana ditampilkan dalam perhitungan berikutnya

$$\Delta t = t_{\text{maks}} - t_{\text{min}} \dots\dots\dots(4)$$

Dengan:

Δt = Selisih waktu
 t_{maks} = waktu tertinggi
 t_{min} = waktu terendah

Sehingga:

$$\begin{aligned} 1) \Delta t \text{ trafo 1} &= t_{\text{maks}} - t_{\text{min}} \\ &= 27,6 - 27,5 \\ &= 0,1 \text{ ms} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2) \Delta t \text{ trafo 2} &= t_{\text{maks}} - t_{\text{min}} \\
 &= 28,6 - 27,5 \\
 &= 1,1 \text{ ms}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3) \Delta t \text{ trafo 3} &= t_{\text{maks}} - t_{\text{min}} \\
 &= 37,4 - 37,2 \\
 &= 0,2 \text{ ms}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 4) \Delta t \text{ P.Geli 1} &= t_{\text{maks}} - t_{\text{min}} \\
 &= 27,6 - 27,1 \\
 &= 0,5 \text{ ms}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 5) \Delta t \text{ P.Geli 2} &= t_{\text{maks}} - t_{\text{min}} \\
 &= 27,8 - 27,6 \\
 &= 0,2 \text{ ms}
 \end{aligned}$$

Tabel 4. 8 Perbandingan Keserempakan Open Terhadap Standar

No	Lokasi	Standar Keserempakan Open	keserempakan open
1	Bay Trafo 1	$\leq 10 \text{ ms}$	0,1 ms
2	Bay Trafo 2	$\leq 10 \text{ ms}$	1,1 ms
3	Bay Trafo 3	$\leq 10 \text{ ms}$	0,2 ms
4	Bay Paya Geli 1	$\leq 10 \text{ ms}$	0,5 ms
5	Bay Paya Geli 2	$\leq 10 \text{ ms}$	0,2 ms

Tabel 4.8 menunjukkan hasil perhitungan nilai keserempakan open pada lima bay yang diuji di GI Glugur dan dibandingkan terhadap standar yang ditetapkan dalam SPLN 52-1:1984, yaitu $\leq 10 \text{ ms}$. Seluruh bay menunjukkan hasil yang memenuhi standar, dengan nilai selisih waktu maksimum antar fasa (keserempakan open) berada pada rentang 0,1 ms hingga 1,1 ms.

Bay Trafo 2 menunjukkan nilai keserempakan terbesar sebesar 1,1 ms, namun tetap berada dalam batas toleransi. Hasil ini mengindikasikan bahwa performa pembukaan kontak PMT di setiap bay masih tergolong serempak dan dapat diandalkan dalam menjaga kestabilan sistem saat terjadi gangguan.

4.2.2 Pengujian Keserempakan Close

Pengujian keserempakan close pada pemutus tenaga (PMT) bertujuan untuk mengevaluasi apakah ketiga fasa (R, S, dan T) dapat melakukan penutupan kontak secara bersamaan setelah menerima perintah tutup. Penutupan yang tidak serempak dapat menyebabkan ketidakseimbangan tegangan, arus masuk awal (inrush current) yang tinggi, serta potensi kerusakan pada peralatan sistem tenaga.

Pengujian dilakukan dengan merekam waktu mulai gerakan kontak (*closing break time*) hingga posisi kontak tertutup sepenuhnya (*fully closed position*) untuk masing-masing fasa. Data hasil pengujian pada beberapa bay ditampilkan pada Tabel 4.9 berikut.

Tabel 4. 9 Data Pengujian Waktu Close

No	Lokasi	Waktu Close (ms)		
		R	S	T
1	Bay Trafo 1	127,6	126,5	126,8
2	Bay Trafo 2	124,9	124,8	123,9
3	Bay Trafo 3	150,1	150,1	150,9
4	Bay Paya Geli 1	126,6	125,1	125,3
5	Bay Paya Geli 2	125,7	127,3	125,4

Berdasarkan Tabel 4.9, terlihat bahwa nilai waktu penutupan (*close*) pada masing-masing bay memiliki variasi antara 123,9 ms hingga 150,1 ms. Waktu penutupan tercepat tercatat pada Bay Trafo 2 dengan nilai rata-rata sekitar 124,4 ms, sedangkan waktu terlama terjadi pada Bay Trafo 3 dengan nilai rata-rata 150 ms, yang melebihi batas standar SPLN 52-1:1984 yaitu ≤ 130 ms.

Bay lainnya seperti Bay Trafo 1, Bay Paya Geli 1, dan Bay Paya Geli 2 masih menunjukkan waktu penutupan yang berada dalam batas toleransi. Hasil ini menjadi indikasi awal terhadap kondisi performa mekanik dan respons kontrol PMT, serta menjadi dasar untuk menghitung nilai keserempakan penutupan antar fasa yang dapat dihitung secara sistematis seperti berikut ini.

- 1) Δt trafo 1 $= t_{\text{maks}} - t_{\text{min}}$
 $= 127,6 - 126,5$
 $= 1,1 \text{ ms}$
- 2) Δt trafo 2 $= t_{\text{maks}} - t_{\text{min}}$
 $= 124,9 - 123,9$
 $= 1 \text{ ms}$
- 3) Δt trafo 3 $= t_{\text{maks}} - t_{\text{min}}$
 $= 150,9 - 150,1$
 $= 0,8 \text{ ms}$
- 4) Δt P.Geli 1 $= t_{\text{maks}} - t_{\text{min}}$
 $= 126,6 - 125,1$
 $= 1,5 \text{ ms}$
- 5) Δt P.Geli 2 $= t_{\text{maks}} - t_{\text{min}}$
 $= 127,3 - 125,4$
 $= 1,9 \text{ ms}$

Tabel 4. 10 Perbandingan Keserempakan Close Terhadap Standar

No	Lokasi	Standar Keserempakan Close	Keserempakan Close
1	Bay Trafo 1	$\leq 10 \text{ ms}$	1,1 ms
2	Bay Trafo 2	$\leq 10 \text{ ms}$	1 ms
3	Bay Trafo 3	$\leq 10 \text{ ms}$	0,8 ms
4	Bay Paya Geli 1	$\leq 10 \text{ ms}$	1,5 ms
5	Bay Paya Geli 2	$\leq 10 \text{ ms}$	1,9 ms

Berdasarkan Tabel 4.10, nilai keserempakan penutupan (*close*) antar fasa pada lima bay yang diuji menunjukkan hasil yang masih sesuai dengan standar SPLN 52-1:1984, yaitu ≤ 10 ms. Nilai keserempakan terkecil terdapat pada Bay Trafo 3 sebesar 0,8 ms, sedangkan nilai tertinggi tercatat pada Bay Paya Geli 2 sebesar 1,9 ms. Seluruh nilai keserempakan ini menunjukkan bahwa perbedaan waktu antar fasa saat proses close masih berada dalam batas toleransi yang ditentukan.

Meskipun waktu close pada Bay Trafo 3 sedikit melebihi ambang batas maksimum 130 ms (sebagaimana tercantum pada Tabel 4.9), namun nilai keserempakan antar fasa tetap stabil di bawah batas toleransi 10 ms. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun kecepatan penutupan total sedikit melambat, koordinasi antar fasa tetap serempak dan tidak menimbulkan ketidakseimbangan signifikan dalam sistem.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan terhadap pengaruh tahanan kontak terhadap rugi daya pada PMT 150 kV di Gardu Induk Glugur, maka dapat disimpulkan:

1. Nilai tahanan kontak pada masing-masing PMT di Gardu Induk Glugur berbeda-beda setiap fasa dan tahunnya, tergantung pada kondisi fisik peralatan dan beban yang terhubung. Nilai tertinggi tercatat pada Bay Trafo 3 tahun 2024 dengan nilai rata-rata $67.3 \mu\Omega$.
2. Terdapat peningkatan nilai rugi daya dan biaya listrik seiring bertambahnya nilai tahanan kontak. Semakin besar tahanan kontak, semakin tinggi rugi daya yang terjadi, sebagaimana dihitung menggunakan rumus $P_{loss} = I^2 \times R$.
3. Energi listrik yang hilang selama satu bulan (720 jam) menunjukkan kerugian biaya yang bervariasi antar bay dan antar fasa. Biaya tertinggi terjadi pada Bay Paya Geli 2 fasa S tahun 2022 sebesar Rp 6.142,78, sedangkan biaya terendah terdapat pada Bay Trafo 2 fasa R tahun 2022 sebesar Rp 1.492,86.

5.2 Saran

Sebagai tindak lanjut dari hasil penelitian ini, penulis memberikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Lakukan pengujian tahanan kontak secara rutin pada setiap PMT, khususnya setelah masa operasi tertentu, untuk mendeteksi potensi peningkatan resistansi sejak dini.
2. Perkuat prosedur pemeliharaan dengan membersihkan permukaan kontak dan mengganti bagian yang aus guna menjaga nilai tahanan tetap rendah dan stabil.

3. Gunakan alat ukur berstandar tinggi, seperti micro-ohm meter yang sesuai dengan standar IEC, agar hasil pengujian lebih akurat dan dapat dijadikan acuan dalam tindakan preventif.
4. Monitoring tren nilai tahanan kontak setiap tahun sangat disarankan, agar dapat dilakukan prediksi dan perencanaan penggantian atau perbaikan sebelum terjadi kegagalan sistem.
5. Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan menganalisis pengaruh suhu lingkungan, kelembaban, dan frekuensi operasi PMT terhadap nilai tahanan kontak, sehingga dapat diperoleh pemahaman yang lebih menyeluruh terhadap degradasi performa PMT.

DAFTAR PUSTAKA

- Aribowo, D., & Desmira. (2018). Analisis Kerugian Daya Pada Saluran Transmisi Tegangan Ekstra Tinggi 500. *Jurnal Teknik Elektro Vol. 1 No, 1*(April), 1–8. <https://koloni.or.id/index.php/koloni/article/view/524%0Ahttps://koloni.or.id/index.php/koloni/article/download/524/500>
- Darminto, P. (2022). Analisis Pengukuran Tahanan Kontak dan Tahanan Pertanahan Pada Pemutus Tenaga. *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro Dan Informatika*, 1(2), 15–22. <https://doi.org/10.55606/jtmei.v1i2.474>
- Hutasuhut, A. A., Rimbawati, R., Pasaribu, F. I., Cholish, C., & Muharnif, M. (2017). Design of motor induction 3-Phase from waste industry to generator for microhydro at isolated village. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 237(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/237/1/012021>
- Irsyam, M., Algusri, M., & Marpaung, L. P. (2023). Analisa Rugi-Rugi Daya (Losses Power) Pada Jaringan Tegangan Rendah Pt. Musimas Batam. *Sigma Teknika*, 6(1), 109–116. <https://doi.org/10.33373/sigmateknika.v6i1.5117>
- Jabar, S. H. A., Nur, M. I., Hafid, A., & Faharuddin, A. (2024). Analisis Tahanan Kontak dan Tahanan Pentanahan pada PMT 150 Kv di Ultg Panakukang. *Arus Jurnal Sains Dan Teknologi*, 2(2), 550–563. <https://doi.org/10.57250/ajst.v2i2.670>
- Mulyani, D., & Hartono, D. (2018). Pengaruh Efisiensi Energi Listrik pada Sektor Industri dan Komersial terhadap Permintaan Listrik di Indonesia. *Jurnal Ekonomi Kuantitatif Terapan*, 1. <https://doi.org/10.24843/jekt.2018.v11.i01.p01>
- Napitupulu, A. S., & Iriani, J. (2022). *Pengaruh Tahanan Kontak Pada Pemutus Tenaga 150 KV Terhadap Rugi Daya di PT PLN (Persero) ULTG Sidikalang Influence of Contact Resistance on 150 KV Circuit Breaker Towards Power Losses at PT PLN (Persero) ULTG Sidikalang.*
- Pasaribu, F. I., Roza, I., Siregar, C., & Sitompul, F. A. (2021). ANALISA PROTEKSI OVER CURRENT RELAY PADA JARINGAN TEGANGAN MENENGAH 20kV DI PELINDO 1 CABANG BELAWAN. *Repository.Umsu.Ac.Id*, 4(1), 18–26.

<http://repository.umsu.ac.id/handle/123456789/14738>

- Pranomo, I. (2019). Analisis Pengujian Pemutus Tenaga Bay Gondangrejo 2 Dalam Pemeliharaan Dua Tahunan Di Gardu Induk Palur. *Universitas Muhammadiyah Surakarta*, 1–13.
- Rahman, E. S., Mappeasse, M. Y., & Hasrul. (2023). Studi Pengujian Keserempakan Pemutus Tenaga (Pmt) 150 Kv Menggunakan Breaker Analyzer Di Gardu Induk. *Media Elektrik*, 2(2), 1–9.
- Sapthu, A. (2023). Listrik Dan Pengaruhnya Terhadap Pertumbuhan Ekonomi Di Provinsi Maluku. *Jurnal Cita Ekonomika*, 17(2), 199–207. <https://doi.org/10.51125/citaekonomika.v17i2.11315>
- Setyawan, A. (2018). Analisa Pengaruh Tahanan Kontak Pemutus Tenaga Pada Kopel Busbar Tegangan Tinggi Terhadap Rugi Daya Penghantar Di Gardu Induk Palur. 18.
- Soedjarwanto, N., Kines, K. E., & Aulia, S. A. (2024). Analisis Tahanan Kontak pada Pemisah (PMS) 150 kV Berdasarkan Hasil Pemeliharaan di PT. PLN (Persero) Gardu Induk Sutami. *Jurnal Teknik Ilmu Dan Aplikasi*, 5(2), 34–40. <https://doi.org/10.33795/jtia.v5i2.4821>
- Sugiyanto, D. E. (2025). Analisis Kelayakan Pemutus Tenaga (PMT) 70 KV Berdasarkan Pengujian Keserempakan, Tahanan Isolasi dan Tahanan Pentanahan dengan Perbandingan Jumlah Pengoperasian pada GI Tanjung Pandan.
- Sumiyati, A., Rahman, P. S., Habil, M., Gusti, C., Melkior, D. A., Hidayat, J., & Aribowo, D. (2024). Konsep Dasar Transmisi Tenaga Listrik : Klasifikasi , Komponen Serta Gangguannya. 11(2), 612–617.
- Susanto, A., Kurnianto, R., & Rajagukguk, M. (2021). Analisa Kelayakan Pemutus Tenaga (Pmt) 150 Kv Berdasarkan Hasil Uji Tahanan Isolasi, Tahanan Kontak Dan Keserempakan Kontak Di Gardu Induk Singkawang. *Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura*, 1–9.
- Sya'roni, Z., & Rijanto, T. (2019). Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi 20 kV Dan Solusinya Pada Jaringan Tegangan Rendah. *Teknik Elektro*, 8(1), 173–180.
- Winantara, B., & Husodo, B. (2019). Evaluasi Tahanan Kontak Pemutus Tenaga

Tegangan Tinggi Di Gardu Induk 150 KV Bandung Selatan Berdasarkan Failure Mode Effect Analysis (FMEA). *Jurnal Teknologi Elektro*, 10(2), 103. <https://doi.org/10.22441/jte.v10i2.004>

Wisnu Kuncoro Jati Rochman. (2024). Kelayakan Pemisah (Disconnect Switch) 500 Kv Berdasarkan Hasil UjiTahanan Isolasi Dan Tahanan Kontak Pada Pltu Buton Adipala. *Journal Of Social Science Research*, 4(3), 9253–9264.

Yusniati, Sahnur Nasution, E., & Indra Pangestu, R. (2019). Analisis Kinerja Circuit Breaker Pada Sisi 150 kV Gardu Induk Lamhotma. *Semnastek Uisu*, 77–82.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Lembar Asistensi Bimbingan



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
Jl. Kapten Muchtar Basri No.3 Medan Telp. (061)6622400

LEMBAR ASISTENSI BIMBINGAN

NAMA : YOGI PANGESTU
NPM : 2107220044
JUDUL : ANALISAPENGARUH TAIHANAN KONTAK TERHADAP RUGI DAYA PADA PEMUTUS TENAGA (PMT) 150 KV DI GARDU INDUK GLUGUR

No.	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
1.	25/3-'25	Acc. Bab I	k.
2.	15/4-'25	Ass. Bab I & penyempurnaan	h.
3.	10/5-'25	Ass. Bab II & Bab III	h.
4.	26/5-'25	Penyempurnaan Bab II & III	h.
5.	02/6-'25	Ass. Bab I & Bab II Ass. mengikuti Skripsi	h.

Dosen Pembimbing

Ir. Abdul Aziz Hutasuhat, MM.



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
Jl. Kapten Muchtar Basri No.3 Medan Telp. (061)6622400

LEMBAR ASISTENSI BIMBINGAN

NAMA : YOGI PANGESTU
NPM : 2107220044
JUDUL : ANALISA PENGARUH TAHANAN KONTAK TERHADAP RUGI
DAYA PADA PEMUTUS TENAGA (PMT) 150 KV GARDU INDUK
GLUGUR

No.	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
1.	24/5 - '25	Ass. Bab III & IV, Evaluasi Hasil Sempur.	h
2.	30/6 - '25	Ass. & Penyempurnaan Bab IV	h
3.	21/7 - '25	Penyempurnaan Data & Grafik	h
4.	30/7 - '25	Ass. Bab IV & V	h
5.	6/8 - '25	Acc mengikuti Semhas.	h

Dosen Pembimbing

Ir. Abdul Aziz Hutasuhut, MM



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
Jl. Kapten Muchtar Basri No.3 Medan Telp. (061)6622400

LEMBAR ASISTENSI BIMBINGAN


NAMA : YOGI PANGESTU
NPM : 2107220044
JUDUL : ANALISA PENGARUH TAHANAN KONTAK TERHADAP RUGI
DAYA PADA PEMUTUS TENAGA (PMT) 150 KV DI GARDU INDUK
GLUGUR

No.	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
1	18/8-'25	Evaluasi akhir hasil seminar	
2	23/8-'25	free meeting sibling sujara	

Dosen Pembimbing

Ir. Abdul Aziz Hutasuhat, M.M

Lampiran 2. Surat Izin Pengambilan Data



PLN
UIP3B SUMATERA
UPT MEDAN

Nomor : 1211/SDM.02.04/F22060000/2025
 Lampiran : 1 Lembar
 Sifat : Segera - Terbatas
 Hal : Ijin Pengambilan Data

10 Juli 2025

Kepada

Yth. Dekan
 Fakultas Teknik
 Universitas Muhammadiyah
 Sumatera Utara
 Jl. Mukhtar Basri No.3 Medan
 20238

Menunjuk surat dari Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro beralamat Jl. Mukhtar Basri No.3 Medan 20238 dengan nomor surat : 1064/II.3.AU/UMSU-07/B/2025 pada tanggal 30 Juni 2025 perihal Pengambilan Data atas nama :

No	Nama Mahasiswa	Npm	Jurusan
1.	Yogi Pangestu	2107220044	Teknik Elektro

Bersama ini di informasikan bahwa untuk pelaksanaan pengambilan data tersebut dapat dilaksanakan di lingkungan kantor PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan Gardu Induk Glugur di mulai tanggal 10 Juli 2025 sampai dengan tanggal 19 Juli 2025, adapun dalam pelaksanaan pengambilan data tersebut hal-hal yang perlu diperhatikan mahasiswa sebagai berikut :

1. Mengisi daftar hadir.
2. Menjaga etika sopan santun dan melaksanakan tata tertib di perusahaan PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan Gardu Induk Glugur.
3. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak menyediakan transportasi dan akomodasi.
4. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak memberikan honorarium dan konsumsi.
5. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak menanggung biaya pemeliharaan kesehatan dan resiko kecelakaan.
6. Mengikuti protokol kesehatan dan keselamatan (K3) yang berlaku.
7. Peserta pengambilan data tidak akan mengekspose data/informasi perusahaan kepada pihak lain.
8. Hasil laporan pengambilan data harus di presentasikan ke ASMAN KONS dan LUR.
9. Menyerahkan copy laporan pengambilan data setelah selesai dilaksanakan ke Gardu Induk Glugur.
10. Untuk laporan pengambilan data ijin dan mekanisme dapat menghubungi Manager ULTG Glugur.

Demikian disampaikan untuk dapat dipergunakan seperlunya terima kasih.

JL. LISTRIK NO. 12 KEL. PETISAH TENGAH KEC. MEDAN PETISAH, MEDAN 20112

T -

F - W -

DALIN SITI WAHYUNI/11 Juli 2025 11:15:49/cetakan ke - 2

1 dari 2



UIP3B SUMATERA
UPT MEDAN

MANAGER UNIT PELAKSANA
TRANSMISI MEDAN,



DONI ADREAN

Tembusan:

1. ASMAN KONS DAN LUR UPT MEDAN PLN
2. MUL ULTG (GLUGUR) ULTG GLUGUR PLN
3. TL JAR TRANS GI (GIS GLUGUR) ULTG GLUGUR PLN

JL. LISTRIK NO. 12 KLL, PETISAH TENGAH KEC. MEDAN PETISAH, MEDAN 20112

T -

F - W -

DALIN SITI WAHYUNI/11 Juli 2025 11:15:49/cetakan ke - 2

2 dari 2

Lampiran 3. Dokumentasi



Kunjungan ke Gardu Induk Glugur



Pengambilan Data dalam *Switchyard* Gardu Induk Glugur

Lampiran 4. Daftar Riwayat Hidup

DAFTAR RIWAYAT HIDUP**A. IDENTITAS PRIBADI**

Nama Lengkap : Yogi Pangestu
 Nomor Induk Mahasiswa : 2107220044
 Tempat, Tanggal Lahir : Medan, 14 Juni 2003
 Alamat : Jl. Ampera IX No.5, Glugur Darat II, Kec.
 Medan Tim., Kota Medan, Sumatera Utara.
 Agama : Islam
 Jenis Kelamin : Laki-Laki
 No. Telp : 085341516971
 E-mail : yogiuniversitas142@gmail.com

B. ORANG TUA

Nama Ayah : Suheri
 Agama : Islam
 Nama Ibu : Rosnan Sari Telaumbanua
 Agama : Islam
 Alamat : Jl. Diponegoro, Ds. Miga, Kec. Gunungsitoli,
 Kota Gunungsitoli, Sumatera Utara.

C. RIWAYAT PENDIDIKAN

Tahun 2006-2015 : SD Negeri 070981 Fodo
 Tahun 2006-2015 : SMP Negeri 04 Gunungsitoli
 Tahun 2006-2015 : SMK Swasta Pembda Nias
 Tahun 2006-2015 : Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara