

**OPTIMASI PENAMBAHAN TRANSFORMATOR SISIPAN
TERHADAP KEANDALAN JARINGAN DI GARDU
DISTRIBUSI MOADK006 AREA KERJA PT PLN (PERSERO)
UNIT LAYANAN PELANGGAN MOA**

TUGAS AKHIR

**Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar S1
Pada Program Studi Teknik Elektro
Universitas Islam Sultan Agung Semarang**



Di susun oleh :

**HENDRAWAN RIKI PRABOWO
30602200164**

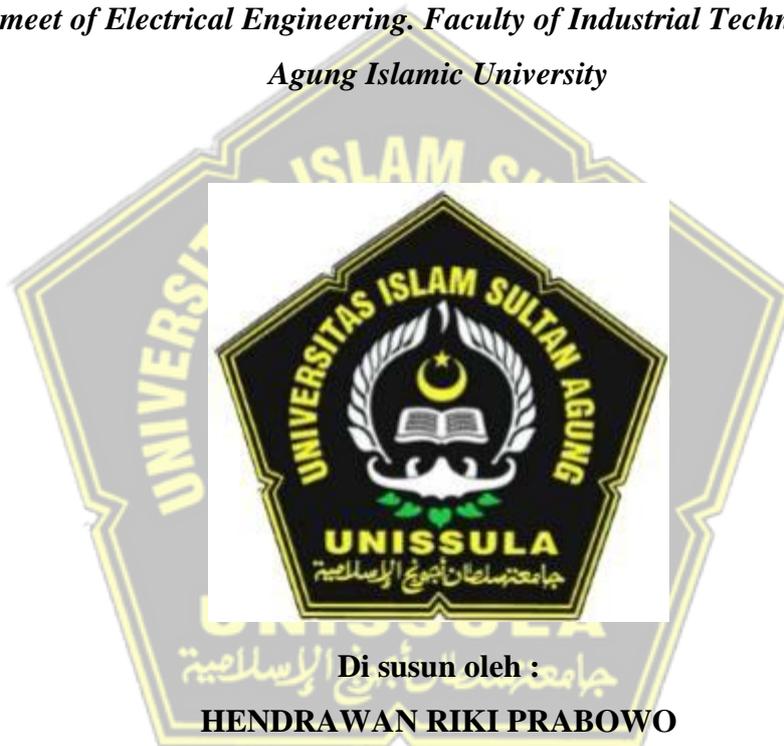
**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2025

***OPTIMIZATION OF THE ADDITION OF INSERT
TRANSFORMERS FOR NETWORK RELIABILITY AT THE
MOADK006 DISTRIBUTION SUBSTATION PT PLN (PERSERO)
UNIT LAYANAN PELANGGAN MOA***

FINAL PROJECT

***Proposed to complete the requirement to obtain a bachelor's degree (S1) at
Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Sultan
Agung Islamic University***



Di susun oleh :

HENDRAWAN RIKI PRABOWO

30602200164

**DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2025

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**OPTIMASI PENAMBAHAN TRANSFORMATOR SISIPAN TERHADAP KEANDALAN JARINGAN DI GARDU DISTRIBUSI MOADK006 AREA KERJA PT PLN (PERSERO) UNIT LAYANAN PELANGGAN MOA**” ini disusun oleh:

Nama : Hendrawan Riki Prabowo
NIM : 30602200164
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Kamis
Tanggal : 6 Maret 2025

Pembimbing I


Ir. Arief Marwanto, ST., M.Eng., Ph.D.

NIDN. 0628097501

Mengetahui,

Ka. Program Studi Teknik Elektro




Lenny Putri Hapsari, ST., MT.

NIDN. 0607018501

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “OPTIMASI PENAMBAHAN TRANSFORMATOR SISIPAN TERHADAP KEANDALAN JARINGAN DI GARDU DISTRIBUSI MOADK006 AREA KERJA PT PLN (PERSERO) UNIT LAYANAN PELANGGAN MOA” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Kamis
Tanggal : 6 Maret 2025

Tim Penguji

Tanda Tangan

Ir. Budi Pramono Jati, MM., MT.
NIDN : 0623126501
Ketua



Dr. Eka Nuryanto Budisusila, ST., MT.
NIDN : 0619107301
Penguji I



Ir. Arief Marwanto, ST., M.Eng., Ph.D.
NIDN. 0628097501
Penguji II



SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Hendrawan Riki Prabowo
NIM : 30602200164
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **“OPTIMASI PENAMBAHAN TRANSFORMATOR SISIPAN TERHADAP KEANDALAN JARINGAN DI GARDU DISTRIBUSI MOADK006 AREA KERJA PT PLN (PERSERO) UNIT LAYANAN PELANGGAN MOA”** adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam daftar pustaka. Tugas Akhir ini adalah milik saya segala bentuk kesalahan dan kekeliruan dalam Tugas Akhir ini adalah tanggung jawab saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, 7 Maret 2025

Yang Menyatakan

A 10,000 Rupiah Indonesian postage stamp is shown with a handwritten signature in black ink over it. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the text 'SEPULEH RIBU RUPIAH', '10000', 'TEL. 20', 'METRAL TEMPAK', and the number '67184AMX062152684'.

Hendrawan Riki Prabowo

PERSEMBAHAN DAN MOTTO

Persembahan :

Pertama,

Tugas Akhir ini akan saya persembahkan kepada kedua orang tua saya yang saya cintai (Bapak Iskak & Ibu Suminem) yang sudah membesarkan saya, memberikan dukungan dan menjadi motivasi hidup saya dalam menyelesaikan studi saya hingga saat ini. Dan juga kepada saudara saya yang menyemangati saya.

Kedua,

Untuk Dosen pembimbing, Dosen Teknik Elektro, beserta admin Teknik Elektro yang selalu sabar menghadapi saya, memberikan ilmu, saran dan pengarahannya.

Ketiga,

Untuk teman seperjuangan Tugas Akhir dan tidak lupa teman-teman Teknik Elektro angkatan 2022 yang saling memberikan dukungan.

Motto :

“Maka sesungguhnya susah kesulitan ada kemudahan”

(QS Al Insyirah : 5)

“Allah tidak membebani seseorang itu melainkan sesuai dengan kesanggupannya”

(QS. Al Baqarah : 286)

“Dan bersabarlah. Sesungguhnya Allah beserta orang – orang yang sabar”

(AQ. Al Insyirah : 5)

“Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah keadaan suatu kaum sebelum mereka mengubah keadaan diri mereka sendiri”

(QS. Ar Ra'd : 11)

“Dan apabila dikatakan. “Berdirilah kamu,” maka berdirilah, niscaya Allah akan mengangkat (derajat) orang – orang yang beriman diantaramu dan orang – orang yang diberi ilmu beberapa derajat”

(QS. Al Mujadilah : 11)

“ Siapa yang menempuh jalan untuk mencari ilmu, maka Allah akan mudahkan baginya jalan menuju surga”

(HR. Muslim. No. 2699)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillahirobbilalamin segala puja dan puji syukur yang tak terhingga atas kehadiran Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat serta hidayah- Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan sekaligus laporan tugas akhir yang berjudul “Optimasi Penambahan Transformator Sisipan Terhadap Keandalan Jaringan di Gardu Distribusi MOADK006 Area Kerja PT. PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Moa” dengan sebaik -baiknya. Sholawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada Nabi besar kita Nabi Muhammad SAW.

Laporan tugas akhir merupakan salah satu syarat bagi mahasiswa/i untuk meraih gelar sarjana (S1) di program studi Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini tidak lepas mendapat bantuan dari berbagai pihak. Dengan rasa setulus hati, penulis ingin menyampaikan banyak terimakasih kepada :

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan ridhonya serta memberikan ketabahan, kesabaran dan kelapangan hati serta pikiran dalam menimba ilmu.
2. Bapak Prof. Dr. H. Gunarto, SH., MH selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Ibu Dr. Ir. Novi Marlyana, ST., MT., selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
4. Ibu Jenny Putri Hapsari, S.T., MT., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
5. Terimakasih kepada Dosen Pembimbing saya Bapak Arief Marwanto yang telah memberikan bimbingan dan dukungan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.

6. Seluruh Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang atas ilmu, bimbingan, dan bantuannya sehingga penulis bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Kedua orang tua saya tercinta yang telah memberikan dukungan baik materiil maupun non materiil dan tidak pernah berhenti mendo'akan saya disetiap sujudnya.
8. Pimpinan, staf dan karyawan PT. PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan (ULP) Moa yang telah membantu mendapatkan data serta bimbingan selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
9. Kepada sahabat seperjuangan saya, yaitu Mahasiswa Teknik Elektro angkatan 2022 yang membantu dalam pembuatan laporan Tugas Akhir ini.

Penulis juga menyadari bahwa dalam penyusunan Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan, baik dari segi materi maupun penyajiannya. Penulis meminta maaf dan juga membutuhkan kritik maupun saran yang membangun dari berbagai pihak, sehingga kedepan Tugas Akhir ini dapat menjadi lebih baik. Akhirnya penulis berharap, semoga laporan ini dapat memberikan manfaat dan wawasan bagi para pembaca dan khususnya bagi penulis juga, wallahua'alam bissowab.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

UNISSULA
جامعة سلطان أبجوع الإسلامية

Semarang, 20 Januari 2025

Hendrawan Riki Prabowo

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	iv
SURAT PERNYATAAN.....	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
PERSEMBAHAN DAN MOTTO	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
ABSTRAK	xix
ABSTRACT.....	xx
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Pembatasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	6
2.1 Tinjauan Pustaka.....	6
2.2 Landasan Teori.....	7
2.2.1 Sistem Distribusi-Tenaga Listrik	7
2.2.2 Gardu Distribusi	8
2.2.3 Transformator.....	14
2.2.4 Penghantar Saluran Udara Tegangan Menengah	16
2.2.5 Transformator Distribusi.....	18
2.2.6 Spesifikasi Transformator Distribusi	21
2.2.7 Prinsip Kerja Transformator	22
2.2.8 Transformator Tiga Fasa.....	22

2.2.9 Hubungan Di Transformator Tiga Fasa	24
2.2.10 Pembebanan Transformator	26
2.2.11 Ketidakseimbangan Beban.....	31
2.2.12 Faktor Daya.....	33
2.2.13 Hukum Kirchoff.....	34
2.2.14 Metode-Metode Mengatasi Transformator <i>Overload</i>	35
2.2.15 Perawatan Transformator	36
2.2.16 Asumsi Pertumbuhan Pembebanan.....	38
BAB III METODE PENELITIAN.....	39
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	39
3.2 Diagram Alir Penelitian	41
3.3 Alat dan Bahan Penelitian.....	42
3.4 Prosedur Pengumpulan Data.....	42
3.5 Tahapan Penelitian.....	43
3.6 Metode Pengolahan Data	44
3.7 Gambar SLD Pemasangan Penambahan Transformator Sisipan.....	47
BAB IV HASIL DAN ANALISIS.....	48
4.1 Hasil Penelitian	48
4.1.1 Data Spesifikasi dan Nameplate Transformator Gardu Distribusi MOADK006.....	48
4.1.2 Data Hasil Pengecekan Visual Gardu Distribusi MOADK006	49
4.1.3 Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan	49
4.1.4 Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 dan Gardu Distribusi Sisipan Sesudah Penambahan Transformator Sisipan 51	
4.2 Pembahasan.....	53
4.2.1 Perhitungan Persentase Pembebanan Transformator Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan	53

4.2.2	Perhitungan Persentase Kelebihan Beban Di Transformator Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan	55
4.2.3	Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan	57
4.2.4	Perhitungan Persentase Jatuh Tegangan (<i>Drop Voltage</i>) Pada Ujung Jaringan di Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan	58
4.2.5	Perhitungan Persentase Pembebanan Transformator Gardu Distribusi MOADK006 dan Gardu Distribusi Sisipan Sesudah Penambahan Transformator Sisipan	59
4.2.6	Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan	62
4.2.7	Perhitungan Persentase Jatuh Tegangan (<i>Drop Voltage</i>) Pada Ujung Jaringan di Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan	63
4.2.8	Perhitungan Estimasi Pertumbuhan Beban Berdasarkan Konsumsi Energi Listrik	65
4.2.9	Penempatan Transformator Sisipan	68
4.3	Analisis	69
4.3.1	Analisis Pembebanan Transformator Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan	69
4.3.2	Analisis Besar Kelebihan Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan	70
4.3.3	Analisis Pembebanan Transformator Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan	70
4.3.4	Analisis Ketidakseimbangan Beban Gardu Distribusi MOADK006 ..	71
4.3.5	Analisis Jatuh Tegangan (<i>Drop Voltage</i>) Pada Ujung Jaringan di Gardu Distribusi MOADK006	71
4.3.6	Analisis Estimasi Pertumbuhan Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006	73

4.3.7 Analisis Faktor Yang Mempengaruhi Terjadinya Beban Lebih Pada Transformator Distribusi.....	73
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	75
5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran.....	76
DAFTAR PUSTAKA	77



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema Sistem Kelistrikan Secara Umum	8
Gambar 2. 2 Single Line Diagram dan Foto Gardu Portal	10
Gambar 2. 3 Gardu Satu Tiang 3 Fasa.....	11
Gambar 2. 4 Single Line Diagram Gardu Beton	11
Gambar 2. 5 Gardu Kios.....	12
Gambar 2. 6 Gardu Mobile atau Bergerak	13
Gambar 2. 7 Gardu Hubung	13
Gambar 2. 8 Transformator Distribusi 3 (Tiga) Fasa	18
Gambar 2. 9 Jenis Trafo Berdasarkan Letak Belitan.....	20
Gambar 2. 10 Prinsip Kerja Transformator	22
Gambar 2. 11 Transformator Hubungan Bintang.....	23
Gambar 2. 12 Transformator Hubungan Delta (Δ).....	23
Gambar 2. 13 Transformator Hubungan Zig-zag (Z).....	24
Gambar 2. 14 Hubungan Segitiga-Segitiga (Δ - Δ).....	25
Gambar 2. 15 Hubungan Bintang-Bintang (Y-Y)	25
Gambar 2. 16 Hubungan Segitiga-Bintang (Δ -Y)	26
Gambar 2. 17 Hubungan Bintang-Segitiga (Y- Δ)	26
Gambar 2. 18 Vektor Diagram Arus	31
Gambar 2. 19 Segitiga Daya.....	33
Gambar 3. 1 Gambar SLD Sisi 20 kV	39
Gambar 3. 2 PLTD Moa	40
Gambar 3. 3 Kantor PT. PLN (Persero)ULP Moa	40
Gambar 3. 4 Diagram Flowchart Perencanaan Penelitian	41
Gambar 3. 5 Gambar SLD Pemasangan Penambahan Transformator Sisipan....	47
Gambar 4. 1 Grafik Perkiraan Peningkatan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 dan Gardu Distribusi Sisipan	68
Gambar 4. 2 Gambar Penempatan Gardu Distribusi Sisipan	69

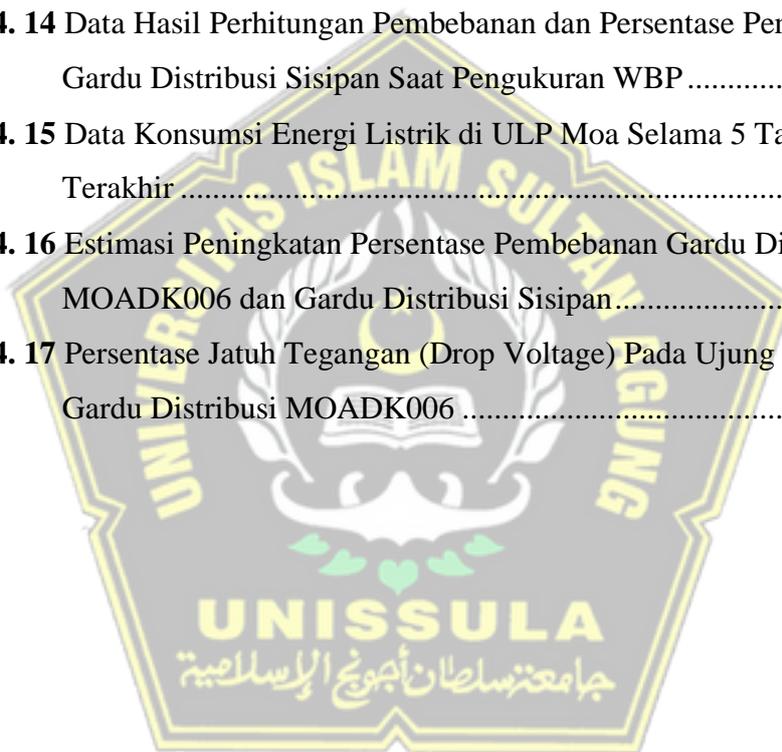
Gambar 4. 3 Grafik Persentase Jatuh Tegangan Gardu Distribusi MOADK006
Sebelum dan Sesudah Penambahan Transformator Sisipan dan
Gardu Sisip Baru 72



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Kapasitas Transformator Distribusi.....	16
Tabel 2. 2	Karakteristik Kawat Penghantar pada jaringan menurut SPLN 64 1985.	17
Tabel 2. 3	Indeks Kesehatan Transformator Distribusi SK ED PLN No.0017.E/DIR/2014.....	30
Tabel 4. 1	Spesifikasi Gardu Distribusi MOADK006	48
Tabel 4. 2	Data Hasil Pengecekan Visual Gardu Distribusi MOADK006.....	49
Tabel 4. 3	Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran LWBP	50
Tabel 4. 4	Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran WBP.....	50
Tabel 4. 5	Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran LWBP	51
Tabel 4. 6	Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran WBP.....	52
Tabel 4. 7	Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi Sisipan Saat Pengukuran LWBP	52
Tabel 4. 8	Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi Sisipan Saat Pengukuran WBP	53
Tabel 4. 9	Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran LWBP	54
Tabel 4. 10	Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran WBP.....	55

Tabel 4. 11 Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran LWBP	60
Tabel 4. 12 Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran WBP.....	60
Tabel 4. 13 Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi Sisipan Saat Pengukuran LWBP.....	61
Tabel 4. 14 Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi Sisipan Saat Pengukuran WBP	61
Tabel 4. 15 Data Konsumsi Energi Listrik di ULP Moa Selama 5 Tahun Terakhir	65
Tabel 4. 16 Estimasi Peningkatan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 dan Gardu Distribusi Sisipan.....	67
Tabel 4. 17 Persentase Jatuh Tegangan (Drop Voltage) Pada Ujung Jaringan di Gardu Distribusi MOADK006	72



ABSTRAK

Gardu Distribusi merupakan salah satu asset penting yang dikelola Perusahaan Listrik Negara (PLN) terutama transformator distribusi guna menyalurkan tenaga listrik ke konsumen. Gardu Distribusi MOADK006 terletak di Desa Wakarleli, Kecamatan Moa, Kabupaten Maluku Barat Daya, Provinsi Maluku dengan kapasitas transformator 100 kVA yang disuplai oleh Penyulang Dalam Kota sistem kelistrikan PLN Moa. Transformator tersebut mengalami kondisi beban melebihi 80% dari kapasitasnya. Untuk mengatasi masalah pembebanan berlebih pada gardu distribusi MOADK006, yang mencapai 93,72% dari kapasitas 100 kVA telah melebihi standar yang ditetapkan oleh SK ED PLN No.0017.E/DIR/2014. Sebagai solusi, dilakukan penambahan transformator sisipan dengan kapasitas 100 kVA. Setelah penambahan transformator sisipan, beban gardu distribusi MOADK006 berkurang menjadi 45,02%, sementara transformator sisipan menanggung beban sebesar 48,81%. Dengan distribusi beban ini, kedua gardu distribusi berada dalam kondisi pembebanan yang baik, yaitu kurang dari 60%, sesuai dengan pedoman SK ED PLN No.0017.E/DIR/2014. Diperkirakan gardu distribusi MOADK006 dapat bertahan hingga 8 tahun kedepan. Pengukuran tegangan pada ujung jaringan sesudah dilakukan penambahan transformator sisipan juga mengalami perbaikan, dimana hasil nilai jatuh tegangan (*Drop Voltage*) pada ujung jaringan sebelum dan sesudah penambahan transformator sisipan sebesar 8,88% menjadi 2,70% untuk fasa R, 7,59% menjadi 3,16% untuk fasa S, dan 7,55% menjadi 2,25% untuk fasa T. Dengan demikian, penambahan transformator sisipan terbukti efektif dalam mengurangi beban pada gardu distribusi MOADK006 dan memperbaiki nilai tegangan pada ujung jaringan, sehingga memenuhi standar operasional yang berlaku.

Kata Kunci : Beban Lebih, Transformator Distribusi, Jatuh Tegangan, Transformator Sisipan.

ABSTRACT

Distribution substation is one of the important assets managed by the State Electricity Company (PLN), especially distribution transformers to distribute electricity to consumers. MOADK006 Distribution Substation is located in Wakarleli Village, Moa Subdistrict, Southwest Maluku Regency, Maluku Province with a transformer capacity of 100 kVA which is supplied by the Inner City Extension of the Moa PLN electricity system. The transformer experiences load conditions exceeding 80% of its capacity. To solve the overloading problem at the MOADK006 distribution substation, which reached 93.72% of the 100 kVA capacity, it has exceeded the standards set by PLN ED Decree No.0017.E/DIR/2014. As a solution, an insert transformer with a capacity of 100 kVA was added. After the addition of the insert transformer, the MOADK006 distribution substation load was reduced to 45.02%, while the insert transformer bears a load of 48.81%. With this load distribution, both distribution substations are in good loading condition, which is less than 60%, in accordance with the guidelines of PLN ED Decree No.0017.E/DIR/2014. It is estimated that the MOADK006 distribution substation can last for the next 8 years. Voltage measurements at the end of the network after the addition of the insert transformer have also improved, where the results of the drop voltage value at the end of the network before and after the addition of the insert transformer amounted to 8.88% to 2.70% for phase R, 7.59% to 3.16% for phase S, and 7.55% to 2.25% for phase T. Thus, the addition of insert transformers has proven effective in reducing the load on the MOADK006 distribution substation and improving the voltage value at the end of the network, thus meeting the applicable operational standards.

Keywords: *Overload, Distribution Transformer, Voltage Drop, Insertion Transformer.*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik sudah menjadi kebutuhan utama bagi masyarakat, tanpa adanya listrik berbagai kegiatan tentunya akan terhambat, bisa dilihat dari berbagai jenis kegiatan memerlukan energi listrik untuk bisa bekerja, seiring dengan berkembangnya perekonomian, energi listrik seakan menjadi kebutuhan utama dalam menjalankan bisnis maupun usaha, tidak hanya berdampak terhadap segi ekonomi, dilihat dari segala aspek kehidupan sebagian besar membutuhkan energi listrik. Melihat betapa pentingnya energi listrik tentu perusahaan kelistrikan di Indonesia yakni PT PLN (Persero) dituntut mampu menyediakan serta mendistribusikan energi listrik untuk masyarakat umum dengan keandalan dan kontinuitas yang terjaga untuk mencegah pemadaman atau gangguan listrik di kemudian hari[1]. Standar pelayanan PLN mencakup penyediaan energi listrik yang berkontinuitas dan berkualitas bagi pelanggan serta pengoptimalan pengelolaan aset yang dimiliki agar selalu bisa beroperasi dengan efisien dan handal[2]. Efisien berarti Energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit kemudian disalurkan hingga beban konsumen mengalami rugi-rugi yang seminimal mungkin, dan handal berarti aset-aset kelistrikan PLN bisa beroperasi dengan baik, tidak menyebabkan gangguan yang bisa mengakibatkan terganggunya proses pendistribusian energi listrik[3].

PT. PLN (Persero) selalu rutin melaksanakan pemeliharaan secara berkala terhadap aset yang dimilikinya untuk menjaga keandalan tersebut, salah satu aset berharga yang dimiliki PLN khususnya di jaringan distribusi yakni Gardu Distribusi dimana komponennya yakni Transformator Distribusi, PHB-TR dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR). Permasalahan yang sering terjadi di gardu distribusi yakni transformator yang mengalami beban lebih atau *overload*. pembebanan transformator yang ideal yakni $< 80\%$ dari kapasitas yang terpasang, jika melebihi $>80\%$ bisa dikatakan transformator tersebut dikatakan *overload*. Transformator

yang mengalami *overload* atau beban lebih bisa mempercepat kerusakan transformator itu sendiri terutama memperpendek *lifetime* atau umur dari transformator itu sendiri karena panas berlebih yang dihasilkan bisa merusak isolasi kumparan transformator, sehingga akan berdampak terhadap kontinuitas penyaluran energi listrik dan bertambahnya pemeliharaan berdasarkan kondisi transformator (*Condition Base Maintenance*) yang memerlukan biaya yang cukup tinggi. Upaya dalam menurunkan beban transformator bisa dilaksanakan dengan beberapa cara yakni menambah kapasitas (*up-rating*) transformator, sisip transformator dan pecah beban dengan metode pindah kopel jurusan gardu distribusi.

Di wilayah kerja PLN ULP Moa di Gardu Distribusi MOADK006 di Penyulang Dalam Kota yang berlokasi di Desa Wakarleli, Kecamatan Moa, Kabupaten Maluku Barat Daya, Provinsi Maluku. ialah gardu berkapasitas 100 kVA yang memiliki pembebanan yang tinggi mencapai 93,72% dari kapasitas transformator yang bisa dikatakan sudah melebihi kapasitas standar transformator atau *overload* dengan pembebanan 93,72 kVA. Sehingga berdasarkan latar belakang di atas diambil permasalahan tersebut untuk diangkat dijadikan Tugas Akhir dengan judul “Optimasi Penambahan Transformator Sisipan Terhadap Keandalan Jaringan di Gardu Distribusi MOADK006 Area Kerja PT. PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Moa”.

1.2 Perumusan Masalah

Bedasarkan latar belakang yang sudah dibuat, maka penulis bisa merumuskan masalah yakni :

- a. Bagaimana analisis pembebanan pada transformator di gardu distribusi MOADK006 Penyulang Dalam Kota sebelum dan sesudah dilaksanakan penambahan Transformator sisipan ?
- b. Berapa kelebihan beban dan ketidakseimbangan beban masing-masing fasa di gardu distribusi MOADK006 Penyulang Dalam Kota sebelum dilaksanakan penambahan Transformator sisipan ?

- c. Bagaimana analisis faktor yang mempengaruhi transformator dalam keadaan *overload* dan cara mengatasi *overload* pada transformator distribusi ?

1.3 Pembatasan Masalah

Agar pembahasan tidak melebar atau meluas jauh dari topik permasalahan yang penulis bahas di Tugas Akhir ini, penulis membatasi permasalahan yakni :

- a. Hanya membahas persentase pembebanan transformator pada gardu distribusi MOADK006.
- b. Hanya membahas persentase kelebihan beban dan besar kapasitas transformator yang sesuai untuk dipakai di gardu distribusi MOADK006.
- c. Hanya membahas penurunan tegangan (*drop voltage*) pada ujung jaringan di gardu distribusi MOADK006.
- d. Hanya membahas faktor yang mempengaruhi transformator dalam keadaan *overload* dan cara mengatasi *overload* pada transformator distribusi.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari studi ini ialah

- a. Mengetahui persentase pembebanan pada transformator di gardu distribusi MOADK006 Penyulang Dalam Kota sebelum dan sesudah dilaksanakan penambahan Transformator sisipan.
- b. Mengetahui persentase kelebihan beban dan ketidakseimbangan beban pada transformator di gardu distribusi MOADK006 Penyulang Dalam Kota sebelum dilaksanakan penambahan Transformator sisipan.
- c. Mengetahui faktor yang mempengaruhi transformator dalam keadaan *overload* dan cara mengatasi *overload* pada transformator distribusi.

1.5 Manfaat

Manfaat dari studi ini ialah yakni :

- a. Bagi penulis dan pembaca memahami dan mempelajari ilmu pengetahuan tentang gardu distribusi dan transformator secara umum, pembebanan di transformator, memahami transformator yang mengalami kondisi beban lebih atau *overload* dengan melaksanakan pengukuran dan perhitungan di gardu

distribusi terkait, memahami teknis pemecahan beban lebih dengan penambahan Gardu sisipan.

- b. Bagi institusi Universitas Islam Sultan Agung, hasil penelitian ini diharapkan bisa memberikan ilmu pengetahuan teknis pemecahan beban lebih memakai metode penambahan gardu sisipan di gardu distribusi yang mengalami *overload* dalam rangka mengurangi pembebanan gardu tersebut, serta kedepannya bisa sebagai acuan untuk penelitian kedepannya.
- c. Bagi perusahaan PT. PLN (Persero), hasil studi ini diharapkan bisa memberikan rekomendasi untuk mengatasi gardu distribusi yang mengalami *overload* dengan memakai metode penambahan Gardu sisipan.
- d. Bagi pembaca bisa memahami permasalahan pembebanan *overload* pada transformator gardu distribusi dan upaya yang dilaksanakan oleh PT. PLN (Persero) ULP Moa untuk mengatasi kondisi tersebut dengan penambahan Gardu sisipan.

1.6 Sistematika Penulisan

Memberikan gambaran secara garis besar, dalam hal ini dijelaskan isi dari masing-masing bab dari laporan ini. Sistematika penulisan dalam pembuatan laporan ini ialah yakni :

BAB I

PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah, batasan penelitian, manfaat dan tujuan penelitian, keaslian penelitian, sistematis penulisan.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA & DASAR TEORI

Berisi tentang materi hasil – hasil penelitian sesuai topik yang dibuat dengan mengadaptasi laporan – laporan, report jurnal, proseding, makalah atau referensi lain. Serta menuliskan kelebihan serta kekurangan di masing – masingnya.

BAB III

METODE PENELITIAN

Berisi tentang model penelitian, alat bahan yang dipakai bisa memakai software/hardware sebagai media pendukung,

memberikan prosedur penelitian, melakukan simulasi atau eksperimen serta memperoleh hasil dari suatu penelitian yang dilaksanakan.

BAB IV**HASIL DAN ANALISIS****BAB V****PENUTUP**

Bab yang mendeskripsikan penyelesaian Tugas Akhir, bisa dibuat pertimbangan dan rekomendasi berdasarkan temuan data penelitian dan analisis yang dilaksanakan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam menyelesaikan proses Tugas Akhir ini, ada beberapa referensi yang bisa dijadikan sebagai acuan dalam menyusun dan melaksanakan penelitian, di antaranya :

- a. Regina C, Lily S, Maickel T (2022), berjudul “Analisis Terjadi Overload Transformator Pada Saluran Distribusi Di PT.PLN (Persero) ULP Bitung”. Penelitian ini tertuju pada Pembebanan lebih pada transformator akan berpengaruh pada kualitas kinerja transformator dimana beban yang berlebih akan menimbulkan panas pada transformator sehingga transformator mengalami gangguan dan dapat mempengaruhi umur transformator yang mana transformator akan bekerja dengan kondisi tidak efisien[4].
- b. Muhammad, Selamat Meliala, Damayanti (2022). Penelitian yang berjudul Mengatasi Beban Lebih Transformator Gardu Distribusi dengan Memakai Trafo Sisip di PT. PLN (Persero) ULP Langsa Kota. Studi ini melakukan studi kasus mengenai permasalahan *overload* / beban lebih pada trafo distribusi dengan mengatasi memakai trafo sisip[5].
- c. Samsulrizal, dan Benyamin Hadinoto (2020). Penelitian yang berjudul Studi Analisis Dampak *Overload* Transformator Terhadap Kualitas Daya Di PT. PLN (Persero) UP3 Pondok Gede. Berdasarkan hasil data, diperoleh bahwa persentase pembebanan gardu JS190 mencapai 95,75% sebelum dilaksanakan uprating transformator. Persentase ini melebihi batas yang ditetapkan dalam SPLN, yang umumnya di bawah 80%, sehingga transformator berada dalam kondisi *overload*. Sesudah dilaksanakan peningkatan kapasitas transformator dari 200 kVA menjadi 400 kVA memakai metode uprating, hasil perhitungan memperlihatkan bahwa persentase pembebanan berkurang menjadi 52,75%, terjadi penurunan persentase pembebanan, sehingga transformator berada dalam kondisi normal dan tidak lagi mengalami *overload*[6].

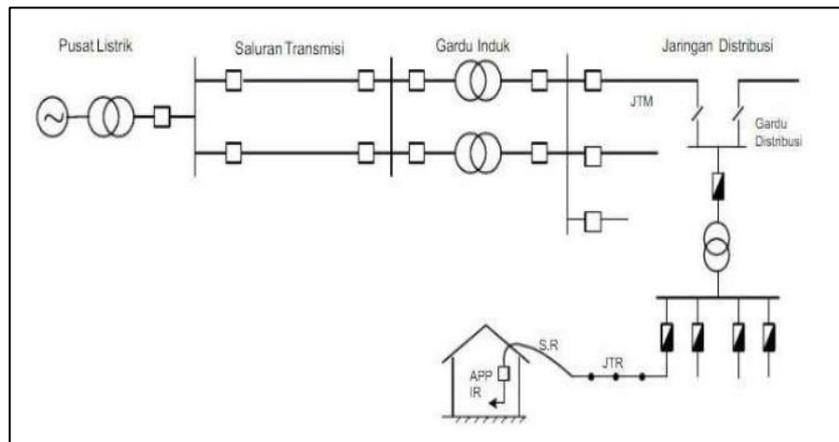
- d. Willy Armando Rabes, I Made Wartana, Irrine Budi S (2023) Perencanaan Pemasangan Gardu Sisipan Pada Gardu Distribusi Mnk 008 Penyulang Kasuari Di PT.PLN (Persero) ULP Manokwari Kota[7].
- e. Wawan Setiawan Anjas, Muh. Ilham (2022) Analisis Pembebanan Trafo Sebelum Penambahan Gardu Sisipan Terhadap Besarnya Kapasitas Daya untuk Memperbaiki Pembebanan pada Gardu Distribusi[8].

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik ialah komponen dari sistem tenaga listrik yang bertugas menyalurkan energi listrik kepada konsumen. Dalam proses ini, sistem distribusi harus dirancang sesuai dengan kondisi lokal, mempertimbangkan faktor beban, perkembangan di masa depan, kendala, dan aspek ekonomi. Sistem distribusi mencakup seluruh jaringan tegangan menengah (JTM) 20 kV dan jaringan tegangan rendah (JTR1) 380/220 Volt yang mengarah ke meteran kilowatt-jam milik pelanggan. Jaringan tegangan menengah (JTM) diklasifikasikan sebagai jaringan distribusi primer, sedangkan jaringan tegangan rendah (JTR) berfungsi sebagai jaringan distribusi sekunder. Energi listrik bisa disalurkan melalui sistem kabel udara atau bawah tanah, dengan saluran distribusi memainkan peran penting dalam transmisi dan alokasi daya listrik dari fasilitas pembangkit ke pengguna akhir[9].

Di berbagai titik dalam jaringan distribusi, gardu induk distribusi diterapkan secara strategis untuk menurunkan tegangan dari 20 kV ke tingkat yang lebih mudah dikelola yakni 380/220 Volt. Dari gardu induk ini, kabel tegangan rendah direntangkan ke seluruh pusat pemukiman, menyediakan listrik bagi perusahaan komersial dan beberapa fasilitas industri di sekitarnya.



Gambar 2. 1 Skema Sistem Kelistrikan Secara Umum

Sumber: Puspita Ayu (2013)

2.2.2 Gardu Distribusi

Gardu distribusi memegang peranan penting dalam jaringan distribusi listrik. Gardu distribusi berperan penting dalam menurunkan tegangan menengah ke tegangan rendah, sehingga listrik menjadi aman dan mudah diakses untuk penggunaan rumah tangga dan komersial[10]. Gardu distribusi ini menampung peralatan vital, termasuk trafo distribusi dan panel kontrol, yang menjamin manajemen daya yang efisien dan layanan yang andal bagi konsumen, bagian nya ialah:[10]

- a. Connector berfungsi menghubungkan atau mencabangkan jaringan TM ke FCO dari gardu distribusi, Connector bisa berupa *Compression Connector* (CCO) ataupun *Live Line Connector* (LLC)
- b. *Fuse Cut Out* (FCO) berfungsi sebagai pengaman terhadap arus hubung singkat dan beban lebih agar tidak merambat ke jaringan tegangan menengah.
- c. *Lightning Arrester* (LA) berfungsi sebagai pengaman atau proteksi terhadap gangguan surja petir dan lain-lain.

Perlengkapan hubung bagi (PHB) mengacu pada sekumpulan perangkat yang dirancang untuk mengelola dan mengalokasikan daya listrik, serta untuk mengatur dan mengamankan sirkuit yang dipakai dalam aplikasi kelistrikan. Bagian-bagian di PHB-TR ada:[10]

- a. *Headbump* Saklar atau *Moulded Case Circuit Breaker* (MCCB) ialah saklar ataupun proteksi terhadap beban lebih maupun *short circuit* yang terjadi di jaringan tegangan rendah.
- b. Pengaman lebur (sekering) ialah perangkat pemutus arus yang bekerja dengan meleburkan bagian komponennya yang sudah dirancang dengan ukuran tertentu. Sekering ini berfungsi untuk membuka rangkaian tempatnya dipasang dan memutus aliran listrik ketika arus yang mengalir melebihi batas tertentu dalam jangka waktu yang cukup. Sekering juga berfungsi untuk mengamankan rangkaian dari *short circuit* agar peralatan yang tersambung terhindar dari kerusakan. Berdasarkan konstruksinya, pengaman lebur untuk tegangan rendah bisa dikategorikan sebagai pelebur tabung semi terbuka dan pelebur tabung tertutup (tipe *NH-fuse* atau *NT-fuse*).
- c. *LV-Board* ialah rakitan yang dirancang untuk pemasangan peralatan Panel Distribusi Tegangan Rendah (PHB-TR). Rakitan ini memiliki struktur pendukung untuk peralatan pelindung dan komponen distribusi, di mana semua bagian yang bertegangan dipasang tanpa isolasi dan diardekan melalui kabel arde khusus. Setiap gardu distribusi bisa menampung maksimal delapan rute, bergantung pada kapasitas daya transformator dan Kapasitas Daya Dukung Arus (KHA) dari konduktor JTR yang dipakai.. JTR juga harus diposisikan pada ketinggian minimal 1,2 meter di atas tanah untuk memastikannya bebas dari potensi banjir.
- d. Rel tembaga atau rel jurusan (Busbar)
Rel tembaga atau rel jurusan berfungsi sebagai penghubung dan pembagi tegangan antara berbagai komponen di PHB-TR yang kemudian dikoneksikan dengan jurusan- jurusan yang menuju ke beban listrik.

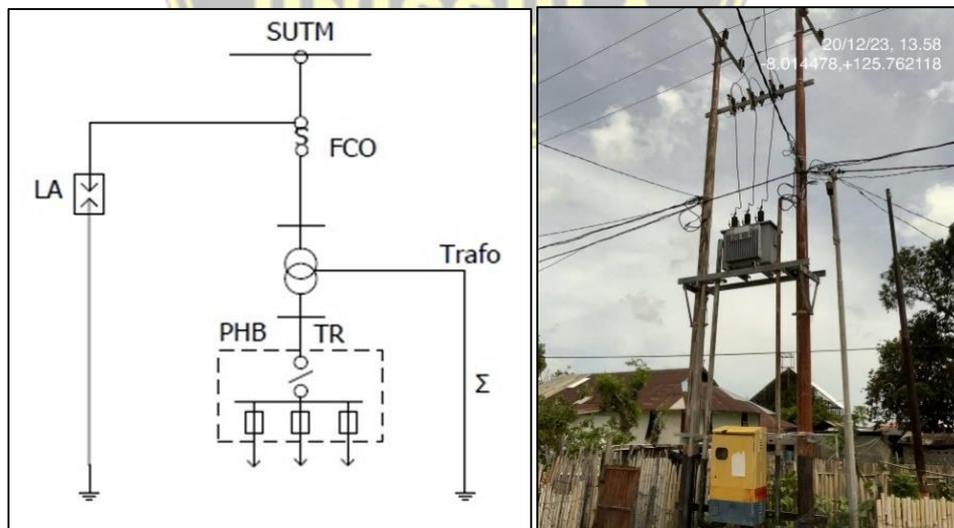
Secara umum gardu distribusi memiliki beberapa jenis berdasarkan jenis pemasangan, jenis konstruksi, dan penggunaannya[11].

1. Jenis pemasangan:
 - a. Gardu pasangan luar: Gardu Portal, Gardu Satu Tiang
 - b. Gardu pasangan dalam: Gardu Beton, Gardu Kios
2. Jenis Konstruksi:

- a. Gardu Beton (bangunan sipil: batu, beton)
 - b. Gardu Kios
 - c. Gardu *Mobile* atau Gardu Bergerak
3. Jenis Penggunaannya:
- a. Gardu Pelanggan Umum
 - b. Gardu Pelanggan Khusus
 - c. Gardu Hubung

A. Gardu Portal

Gardu portal ialah bentuk gardu listrik luar ruangan yang dicirikan oleh konstruksi kutub ganda. Trafo ditinggikan setidaknya 3 meter di atas permukaan tanah, ditopang oleh platform yang dirancang untuk memudahkan tugas operasional dan pemeliharaan teknisi. Penempatan yang tinggi ini penting, karena berat trafo bertambah seiring dengan kapasitas daya. Di gardu portal, trafo bisa memiliki kapasitas maksimum 400 kVA, yang diperlukan oleh sistem pendukung kutub ganda; kapasitas trafo minimum ditetapkan pada 100 kVA, sehingga melebihi gardu satu kutub dan mengoptimalkan desain struktural gardu portal. Tiang yang dipakai dalam jenis gardu distribusi ini dibangun dari beton atau besi, masing-masing memiliki kekuatan mekanis minimum 500 daN, dengan ketinggian berkisar antara 11 hingga 12 meter.[11]



Gambar 2. 2 *Single Line Diagram* dan Foto Gardu Portal

Sumber: Ratno Winayu (2010)

B. Gardu Satu Tiang

Gardu satu tiang ialah fasilitas listrik luar ruangan yang dicirikan dengan mengandalkan tiang beton atau besi tunggal sebagai penyangga struktural. Kapasitas transformator yang terpasang biasanya berkisar antara minimal 25 kVA hingga maksimal 100 kVA. Setiap tiang dalam konfigurasi ini harus memiliki kekuatan mekanis minimal 500 dAN dan biasanya dibangun pada ketinggian 11 atau 12 meter.[11]



Gambar 2. 3 Gardu Satu Tiang 3 Fasa

Sumber: PT. PLN (Persero) ULP Moa (2024)

C. Gardu Beton

Gardu Beton mengacu pada fasilitas yang semua komponen pentingnya ditempatkan dalam struktur sipil yang dibangun dari bahan yang tahan lama seperti batu dan beton. Desain arsitektur ini dimaksudkan untuk mengoptimalkan kinerja dan keandalan sistem keamanan listrik. Biasanya, gardu induk beton memanfaatkan saluran distribusi jenis kabel atau SKTM untuk penyaluran daya yang efektif.[11]



Gambar 2. 4 Single Line Diagram Gardu Beton

Sumber: Ratno Winayu (2010)

D. Gardu Kios

Gardu kios ialah fasilitas rekayasa yang dibangun dari baja, fiberglass, atau kombinasi dari bahan-bahan ini. Gardu induk ini ditempatkan secara strategis di area yang tidak memungkinkan untuk membangun gardu induk beton tradisional. Karena desainnya yang mudah dipindahkan dan hemat ruang, kapasitas transformator dibatasi hingga maksimum 400 kVA. Berbagai konfigurasi gardu induk kios tersedia, termasuk gardu induk kios kompak, gardu induk kios modular, dan gardu induk kios bertingkat. Gardu induk kios kompak menawarkan keuntungan signifikan karena semua komponen utamanya sudah dirakit sebelumnya di pabrik, sehingga menghasilkan proses pemasangan yang lebih ramping dan efisien dibandingkan dengan gardu induk beton.[11]



Gambar 2. 5 Gardu Kios

Sumber: Ratno Winayu (2010)

E. Gardu Mobil atau Gardu *Mobile*

Gardu yang sering disebut dengan gardu *Mobile* atau gardu bergerak, karena secara umum terpasang didalam mobil sering disebut gardu mobil. Gardu ini memiliki bangunan pelindung yang ditempatkan di atas kendaraan, sehingga bisa dipindahkan sesuai dengan lokasi yang membutuhkan. Gardu mobil biasanya dipakai untuk kondisi sementara (darurat) guna memenuhi kebutuhan daya yang bersifat temporer baik itu karena terjadi pemeliharaan ataupun event penting didaerah tersebut.[11]



Gambar 2. 6 Gardu Mobile atau Bergerak

Sumber: Ratno Winayu (2010)

F. Gardu Hubung

Jaringan distribusi listrik pada dasarnya rentan terhadap gangguan. Untuk mengurangi dampak gangguan feeder yang tidak terduga yang bisa menghambat penyaluran daya di gardu distribusi, gardu induk switching diimplementasikan untuk menghubungkan feeder dan gardu distribusi. Gardu Induk Switching, juga disebut sebagai Gardu Induk Switching (GH), berfungsi sebagai fasilitas penting untuk mengelola kontrol beban listrik selama pemadaman listrik, kegiatan pemeliharaan, atau untuk memastikan kelangsungan layanan. Di dalam Gardu Induk Switching, konfigurasi Sakelar Pemutus Beban (LBS) dan/atau pemutus sirkuit diatur secara paralel. Selain itu, infrastruktur Gardu Induk Switching bisa dirancang untuk mencakup area khusus untuk gardu distribusi, serta ketentuan untuk operasi kendali jarak jauh.[11]



Gambar 2. 7 Gardu Hubung

Sumber: Ratno Winayu (2010)

2.2.3 Transformator

Transformator merupakan perangkat listrik statis yang dirancang untuk mentransfer tegangan arus bolak-balik (AC) antar lilitan, memfasilitasi konversi energi listrik melintasi satu atau lebih rangkaian melalui kopling magnetik, berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik pada frekuensi konstan khususnya, 50 Hz di Indonesia. Trafo memainkan peran penting dalam sistem tenaga listrik dan elektronik. Dalam infrastruktur tenaga listrik, trafo berfungsi sebagai trafo *step-up* untuk menaikkan level tegangan untuk transmisi dari fasilitas pembangkit listrik. Sebaliknya, trafo juga berfungsi sebagai trafo *step-down* untuk menurunkan tegangan untuk distribusi, memastikannya sesuai untuk aplikasi dan beban konsumen[12].

Transformator ialah perangkat rumit yang terdiri dari inti yang dibuat dari besi berlapis, dilengkapi dengan dua kumparan penting: kumparan primer dan sekunder. Hubungan antara tegangan terkait erat dengan rasio lilitan pada kumparan ini. Biasanya, kumparan ini dibuat dari kawat tembaga yang dililitkan dengan hati-hati di sekitar "kaki" inti transformator. Mekanisme dasar pemindahan energi dalam transformator bergantung pada penerapan tegangan bolak-balik ke lilitan primer, yang menghasilkan medan magnet. Medan magnet ini menciptakan fluks magnet yang berpotongan dengan konduktor di lilitan sekunder, yang menginduksi tegangan di terminalnya. Besarnya tegangan di kedua terminal berbanding lurus dengan jumlah lilitan di setiap lilitan. Dalam teknik listrik, transformator memiliki berbagai fungsi, dan aplikasinya bisa dikategorikan ke dalam kelompok yang berbeda, yakni:

1. Transformator daya, Ini ialah transformator yang dipakai untuk meningkatkan tegangan pembangkit ke tingkat yang sesuai untuk transmisi dan distribusi.
2. Transformator distribusi, ialah transformator dipakai untuk menurunkan tegangan transmisi / tegangan distribusi menjadi tegangan distribusi / tegangan rendah
3. Transformator pengukuran, ialah transformator yang terdiri dari transformator arus dan transformator tegangan.

A. Pengelompokan transformator berdasarkan fasanya terdiri atas 2 yakni transformator 1 (satu) fasa dan transformator 3 (tiga) fasa.

1. Transformator 1 (Satu) Fasa

Trafo fase tunggal, yang sering disebut sebagai trafo fase tunggal, ialah perangkat yang berfungsi dalam sistem arus bolak-balik yang memiliki satu saluran tegangan yang berubah secara bersamaan. Jenis trafo ini terutama dipakai untuk aplikasi yang dicirikan oleh beban pencahayaan dan pemanas. Trafo fase tunggal biasanya dipakai di lingkungan perumahan yang konsumsi listriknya relatif rendah.

2. Transformator 3 (Tiga) Fasa

Trafo tiga fase dicirikan oleh inti yang terdiri dari tiga kaki, yang masing-masing menampung lilitan primer dan sekunder. Pada dasarnya, trafo jenis ini terdiri dari tiga trafo individual yang disusun dalam konfigurasi tertentu. Biasanya, lilitan primer dikonfigurasi dalam formasi bintang (Y), sedangkan lilitan sekunder disusun dalam formasi delta (Δ). Di dalam trafo, tiga konduktor mengalirkan arus bolak-balik (AC) pada frekuensi yang sama, meskipun mencapai nilai puncaknya pada interval yang berbeda-beda

B. Tegangan nominal berfungsi sebagai tegangan operasi dasar yang dipakai dalam perancangan dan implementasi instalasi dan peralatan listrik. Trafo distribusi bisa dikategorikan menjadi dua kelas berbeda berdasarkan tegangan nominalnya, yakni[13]:

1. Tegangan primer transformator distribusi harus sesuai dengan tegangan nominal yang dipakai dalam jaringan distribusi primer. Level tegangan yang umum dalam jaringan tersebut meliputi 6 kV, 12 kV, dan 20 kV.

2. Tegangan sekunder mengacu pada tegangan nominal yang ada pada sisi sekunder transformator distribusi, yang sesuai dengan standar tegangan distribusi sekunder yang relevan di Indonesia, khususnya 230/400V.

C. Daya Nominal ialah kapasitas daya yang menjadi dasar dalam pembuatan peralatan listrik. Berdasarkan daya nominalnya, transformator distribusi bisa dikategorikan yakni[13]:

Tabel 2. 1 Kapasitas Transformator Distribusi[4]

Kapasitas	Dimensi Trafo (mm)			Volume Minyak Trafo	Berat Trafo
	kVA	Panjang	Lebar	Tinggi	Liter
25	1030	555	1020	120	415
50	1170	600	1080	160	615
100	1045	700	1150	188	690
160	1170	700	1185	276	955
200	1240	790	1295	282	1115
250	1320	790	1290	320	1260
315	1360	810	1450	285	1415
400	1495	900	1615	510	1990
630	1600	960	1740	615	2665
1000	1830	1215	1660	712	3285
1250	1860	1215	1730	815	3705

Sumber: PT. PLN (Persero) (2007)

2.2.4 Penghantar Saluran Udara Tegangan Menengah

Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) berfungsi sebagai solusi yang sangat hemat biaya untuk penyaluran energi listrik pada tingkat daya yang konsisten. Infrastruktur ini sebagian besar dipakai oleh konsumen jaringan tegangan menengah di Indonesia. Ciri khas jaringan ini ialah penggunaan konduktor polos, yang digantung oleh isolator yang dipasang pada tiang besi atau beton. Mengingat penggunaan konduktor polos, penting untuk mempertimbangkan parameter keselamatan listrik, seperti menjaga jarak aman minimal 20 kV antara konduktor dan entitas di sekitarnya, yang bisa mencakup konduktor lain, bangunan, tumbuhan, atau aksesibilitas manusia. Selain itu, konduktor setengah terisolasi, khususnya AAAC-S (inti tunggal setengah terisolasi), termasuk dalam kategori SUTM. Meskipun penerapan konduktor ini tidak memberikan jaminan mutlak terhadap tegangan sentuh yang ditetapkan, tujuan utamanya ialah untuk mengurangi risiko gangguan sementara, terutama yang disebabkan oleh kontak dengan pohon atau hewan. Konduktor yang dipakai dalam saluran distribusi memiliki resistansi dan impedansi bawaan, yang secara signifikan memengaruhi kemandirian penyaluran energi listrik. Nilai impedansi sangat penting untuk

perhitungan yang melibatkan penurunan tegangan, aliran daya, kondisi hubung singkat, dan rugi-rugi jaringan[14]. Berikut ini ialah karakteristik kabel konduktor dalam jaringan, sebagaimana diuraikan dalam SPLN 64 1985.

Tabel 2. 2 Karakteristik Kawat Penghantar pada jaringan menurut SPLN 64 1985.

Σ penghantar	Penghantar		Tahanan maks pada DC temp 20 ⁰ C	Tahanan pada AC temp 90 ⁰ C	saat operasi		Maks kapasitas arus temp 30 ⁰ C		Arus hub singkat selama 1 detik	Teg nom. prcbrn
	Luas pnmprg	Cu /Al			Induktansi (L)	Kapasitansi (C)	dlm tanah	di udara		
	mm ²		Ohm/km	Ohm/km	mH/km	mF/km	Amp	Amp	kA	kV/5 min
3	35	Cu	0,5240	0,6680	0,520	0,131	164	173	5,01	30
		Al	0,8680	1,1130	0,520	0,131	127	139	3,29	30
3	50	Cu	0,3870	0,4940	0,497	0,143	194	206	7,15	30
		Al	0,6410	0,8220	0,497	0,143	148	161	4,70	30
3	70	Cu	0,2680	0,3420	0,467	0,162	236	257	10,01	30
		Al	0,4430	0,5680	0,467	0,162	179	204	6,58	30
3	95	Cu	0,1930	0,2470	0,445	0,180	283	313	13,59	30
		Al	0,3200	0,4110	0,445	0,180	214	242	8,93	30
3	120	Cu	0,1530	0,1960	0,430	0,195	322	360	17,16	30
		Al	0,2530	0,3250	0,430	0,195	246	292	11,28	30
3	150	Cu	0,1240	0,1590	0,414	0,213	362	410	21,45	30
		Al	0,2060	0,2650	0,414	0,213	264	313	14,10	30

Sumber: PT. PLN (Persero)

Untuk meningkatkan keamanan dan keandalan penyaluran tenaga listrik, disarankan untuk mengganti konduktor polos atau konduktor setengah terisolasi yang saat ini dipakai dalam jaringan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) 20 kV dengan konduktor terpinil yang terisolasi penuh. Pendekatan inovatif ini memastikan bahwa setiap fase dilengkapi dengan isolasi yang menghilangkan kebutuhan akan perlindungan mekanis tambahan. Selain itu, berat kabel pinil menjadi faktor penting dalam menentukan kekuatan beban kerja tiang beton yang menopangnya. Konstruksi penghantar udara ini memakai AAAC (*all aluminium*

alloy conductors), yakni kawat penghantar yang sepenuhnya terbuat dari campuran aluminium.

1. Penghantar Telanjang (BC: *Bare Conductor*)

Konduktor ini tersusun dari tembaga (Cu) atau aluminium (Al) dan memiliki penampang melingkar padat. Saat ini, konduktor polos yang paling banyak dipakai ialah Konduktor AAC dan AAAC. Karena tingginya harga tembaga global, pemanfaatan konduktor tembaga menjadi semakin tidak praktis.

2. Penghantar Berisolasi Setengah AAAC-S (*half insulated single core*)

Konduktor ini dibuat dari aluminium dan diisolasi memakai polietilena ikatan silang (XLPE), dengan tegangan maksimum 6 kV.

3. Penghantar Berisolasi Penuh (*Three single core*)

Konduktor ini terbuat dari XLPE dan dilapisi PVC dengan penopang penghantar baja, serta memiliki batas tegangan pengenalan 12/20 (24) kV. Penghantar jenis ini khusus dipakai untuk SKUTM dan berisolasi penuh.

2.2.5 Transformator Distribusi

Transformator distribusi ialah komponen penting yang terletak di gardu induk distribusi, yang menjalankan fungsi penting untuk menyalurkan energi listrik dari sumber daya terpusat ke beban pengguna akhir. Trafo *step-down* 20/0,4 kV biasanya dipakai dalam kapasitas ini, yang dicirikan oleh tegangan fasa sistem JTR sebesar 400 V dan tegangan netral sebesar 230 V.



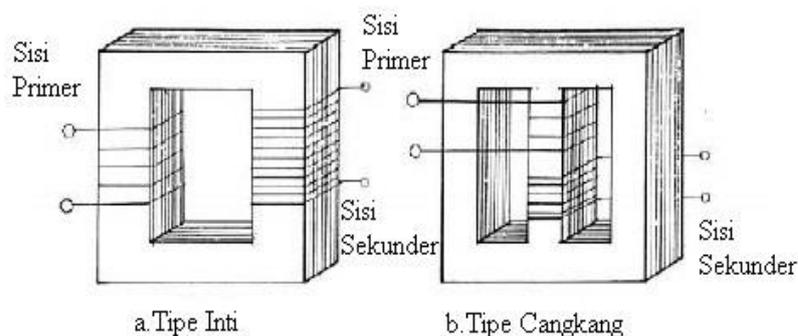
Gambar 2. 8 Transformator Distribusi 3 (Tiga) Fasa

Sumber: PT. PLN (Persero) (2020)

A. Struktur transformator distribusi terdiri atas berbagai komponen:

1. Inti, terdiri dari lempengan - lempengan plat besi lunak atau baja silikon yang diklem atau disusun menjadi satu kesatuan.
2. Belitan atau kumparan ialah kawat email berisolasi yang terbuat dari tembaga, yang dililitkan pada inti dalam bentuk spiral atau konsentrik. Kumparan dibagi menjadi dua yakni kumparan primer dan kumparan sekunder.
3. Sistem pendinginan, bagian ini berfungsi mengurangi panas di trafo dilaksanakan pendinginan di transformator. Sedangkan cara pendinginan transformator distribusi ada dua macam yakni: *Oil Natural Air Natural (ONAN)* memakai minyak transformator dan udara secara alami bersirkulasi dengan sirip-sirip transformator, *Oil Natural Air Force (ONAF)* memakai minyak di tangki transformator dan udara yang diperoleh dari kipas atau fan yang bekerja sesuai dengan setting temperaturnya.
4. *Arrester*, sebagai pengaman transformator terhadap tenggangan lebih yang disebabkan oleh sambaran petir dan *switching*.
5. Minyak transformator, berfungsi sebagai isolasi di kumparan dan inti besi, serta sebagai pendingin dimana kumparan dan inti transformator tersebut terendam minyak tersebut.
6. Isolator Bushing, berfungsi sebagai penghubung rangkaian dalam dari transformator ke rangkaian luar serta sebagai penyekat atau isolasi antara keluaran primer ataupun sekunder transformator dengan bodi atau badan transformator.
7. Tangki dan Konserfator, Tangki berfungsi sebagai tempat minyak transformator dan konserfator berfungsi sebagai penampung pemuaiian minyak akibat perubahan temperature.
8. Katub Pembuangan dan Pengisian, katup pembuangan transformator berfungsi untuk menguras minyak saat proses penggantian atau perawatan minyak transformator, sedangkan katup pengisian berfungsi untuk mengisi atau menambahkan atau mengambil sample minyak di transformator.
9. Level Oli, berfungsi sebagai penanda isi minyak di tangki transformator, yang hanya ada di trasformator kapasitas 100 kVA keatas.

10. Indikator Suhu Transformator, berfungsi untuk memantau suhu atau temperatur di minyak transformator ketika beroperasi, di trafo yang berkapasitas besar indikator tersebut terhubung dengan relai temperatur.
 11. Pernapasan Transformator, Variasi beban transformator dan suhu udara eksternal menyebabkan fluktuasi suhu oli di dalam transformator. Saat suhu oli naik, oli mengembang, menggantikan udara di atasnya dan mengeluarkannya dari tangki. Sebaliknya, saat suhu turun, oli menyusut, memungkinkan udara eksternal masuk ke dalam tangki. Proses ini, yang dikenal sebagai pernapasan transformator, mengakibatkan permukaan oli terpapar langsung ke atmosfer eksternal, yang sering kali lembap. Untuk mengurangi dampak kelembapan ini, perangkat yang berisi bahan higroskopis, seperti gel silika, dipasang di ujung saluran pernapasan untuk menyerap kelembapan dari udara yang masuk.
 12. *Tap Changer* Transformator, Berfungsi sebagai instrumen pembanding transformasi untuk mencapai tegangan sekunder yang sesuai dengan tegangan target yang ditentukan yang berasal dari tegangan primer yang berfluktuasi. Setiap tap changer hanya bisa diaktifkan dalam kondisi saat transformator tidak diberi energi, yang umumnya disebut sebagai "*Off Load Tap Changer*," dan proses ini dijalankan secara manual.
- B. Berdasarkan dari letak belitannya, maka trafo dikategorikan 2 jenis, yakni :
1. Trafo jenis inti (*core type*), yakni trafo dengan belitan mengelilingi inti.
 2. Trafo jenis cangkang (*shell type*), yakni inti trafo ini mengelilingi belitannya.



Gambar 2. 9 Jenis Trafo Berdasarkan Letak Belitan

Sumber: PT. PLN (Persero) (2020)

2.2.6 Spesifikasi Transformator Distribusi

Transformator distribusi dipakai untuk menyalurkan tenaga listrik dari pusat pembangkit ke beban pelanggan. Fungsinya ialah menurunkan tegangan tinggi (*step-down*) agar sesuai dengan kebutuhan peralatan konsumen, selain juga dipakai untuk keperluan pusat listrik. Spesifikasi transformator distribusi sudah diatur dalam SPLN sebagai pedoman dalam pemilihan, pengoperasian, dan pemeliharannya.[12]

1. Tegangan Pengenal dan Penyardapan

A. Tegangan Primer

Disesuaikan dengan tegangan nominal sistem di jaringan tegangan menengah (JTM) ialah 20 kV.

B. Tegangan Sekunder

Di tegangan sekunder, sistem tegangan nominal di jaringan tegangan rendah yakni:

- Transformator fase tiga: 400 V.
- Transformator fasa tunggal: 230 V.

C. Penyardapan

Penyardapan dilaksanakan di belitan primer ada tiga macam penyardapan tanpa beban yakni:[12]

- Sadapan tiga langkah: 21, 20, 19 kV
- Sadapan lima langkah: 22, 21, 20, 19, 18 kV
- Sadapan lima langkah: 21, 20.5, 20, 19.5, 19 kV

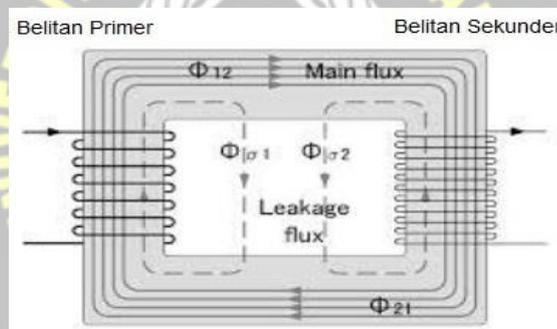
2. Daya Pengenal Transformator

Kapasitas daya terukur yang umum dipakai untuk transformator fase tunggal ialah 25 kVA dan 50 kVA. Sebaliknya, transformator fase tiga tersedia dalam rentang kapasitas daya terukur yang lebih luas, termasuk 50 kVA, 100 kVA,

160 kVA, 200 kVA, 250 kVA, 315 kVA, 400 kVA, 500 kVA, 630 kVA, 800 kVA, 1000 kVA, dan 1250 kVA.

2.2.7 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip pengoperasian transformator bisa dijelaskan melalui hukum Ampere dan hukum Faraday, yang menyatakan bahwa arus listrik menghasilkan medan magnet dan medan magnet yang berubah menginduksi arus listrik. Ketika arus bolak-balik disuplai ke kumparan primer transformator, maka akan menghasilkan serangkaian garis gaya atau fluks magnet di dalam kumparan. Fluks magnet ini berubah sesuai dengan bentuk gelombang sinusoidal, yang menghasilkan induksi di dalam kumparan primer. Akibatnya, kumparan sekunder mengalami perubahan fluks magnet yang sesuai, yang mencerminkan yang dihasilkan oleh sisi primer, sehingga memfasilitasi induksi di sisi sekunder[12]. Konsep ini diilustrasikan dalam diagram terlampir:



Gambar 2. 10 Prinsip Kerja Transformator

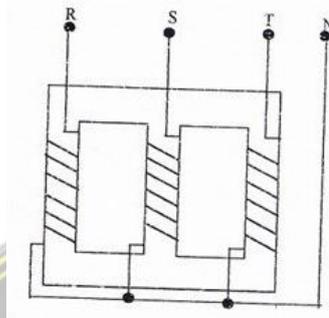
Sumber: Kho Dickson (2021)

2.2.8 Transformator Tiga Fasa

Transformator tiga fasa bisa dibangun memakai tiga trafo fase tunggal; namun, trafo tiga fase lebih umum terdiri dari tiga trafo fase tunggal yang ditempatkan dalam satu inti. Trafo tiga fase berisi tiga lilitan primer dan tiga lilitan sekunder. Lilitan ini bisa dikonfigurasi dalam formasi bintang (Y) atau delta (Δ). Secara umum, trafo tiga fase dikenali dari tiga konfigurasi sambungannya: bintang (Y), delta (Δ), dan zig-zag (Z). Kumparan primer dan sekunder trafo tiga fase bisa saling dihubungkan dengan berbagai cara:[15]

1. Hubungan Bintang (Y)

Koneksi bintang mengacu pada konfigurasi transformator tiga fase di mana terminal kumparan saling terhubung. Titik pertemuan terminal ini dikenal sebagai titik netral. Dalam notasi ini, huruf kapital 'Y' memperlihatkan sisi tegangan tinggi transformator, sedangkan huruf kecil 'y' memperlihatkan sisi tegangan rendah.[15]

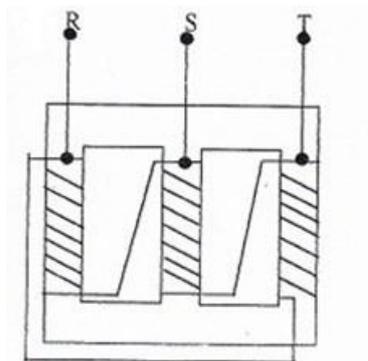


Gambar 2. 11 Transformator Hubungan Bintang

Sumber: Sumanto MA (1991)

2. Hubungan Segitiga (Δ)

Sambungan segitiga ialah sambungan transformator tiga fase yang ujung-ujung belitan fasa utama dan fasa kedua disambung, ujung-ujung fasa kedua dan ketiga disambung, serta ujung-ujung fasa ketiga dan fasa pertama disambung. Alternatifnya, dari penggulungan fasa pertama sampai akhir fasa kedua, permulaan fasa kedua dengan akhir fasa ketiga, dan permulaan fasa ketiga dengan akhir fasa pertama. Huruf kapital D melambangkan sisi tegangan tinggi, sedangkan huruf kecil d melambangkan sisi tegangan rendah.[15]

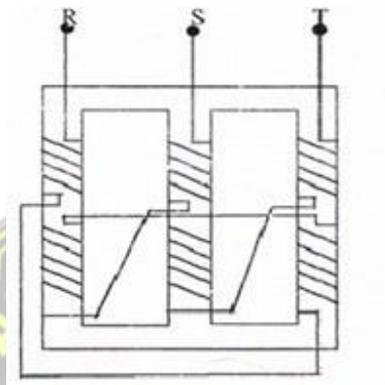


Gambar 2. 12 Transformator Hubungan Delta (Δ)

Sumber: Sumanto MA (1991)

3. Hubungan Zig-zag (Z)

Sambungan belitan transformator tiga fase diatur sedemikian rupa sehingga salah satu ujung belitan setiap fase terhubung ke titik yang sama, yang sering disebut titik netral. Z ialah huruf kapital untuk sisi tegangan tinggi dan huruf kecil untuk sisi tegangan rendah.[15]



Gambar 2. 13 Transformator Hubungan Zig-zag (Z)

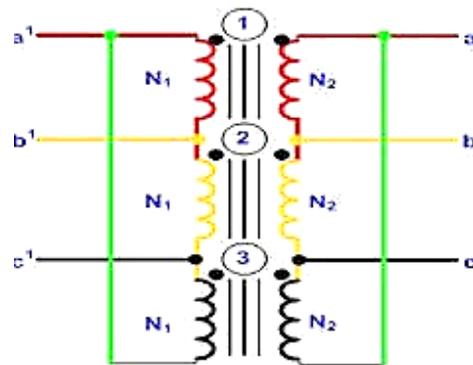
Sumber: Sumanto MA (1991)

2.2.9 Hubungan Di Transformator Tiga Fasa

Di transformator tiga fasa, sistem hubungan antara sisi kumparan primer dan kumparan sekunder dikenal 4 macam hubungan yakni[15]:

a. Hubungan Segitiga-Segitiga ($\Delta - \Delta$)

Bila ketiga kumparan primer saling terhubung dalam konfigurasi seri, mereka membentuk sirkuit tertutup menyerupai segitiga, yang memiliki tiga terminal yang sesuai dengan kabel fase. Konfigurasi ini disebut sebagai koneksi delta-delta ($\Delta - \Delta$). Susunan ketiga kumparan sekunder mencerminkan pengaturan ini, yang membentuk hubungan delta-delta ($\Delta - \Delta$) antara kumparan primer dan sekunder.[15]

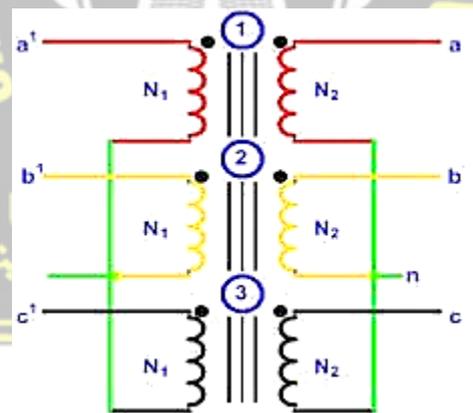


Gambar 2. 14 Hubungan Segitiga-Segitiga (Δ - Δ)

Sumber: Sumardjati, Prih, dkk. (2013)

b. Hubungan Bintang-Bintang (Y – Y)

Bila ujung-ujung lilitan kawat dari tiga lilitan primer dan lilitan sekunder disambungkan menjadi satu, maka akan terbentuk hubungan bintang-bintang (Y–Y), dengan saluran nol (ground) berfungsi sebagai titik bintang. Ada empat sambungan karena kawat fase terpasang pada masing-masing lilitan kawat yang membungkus tiga ujung lainnya.

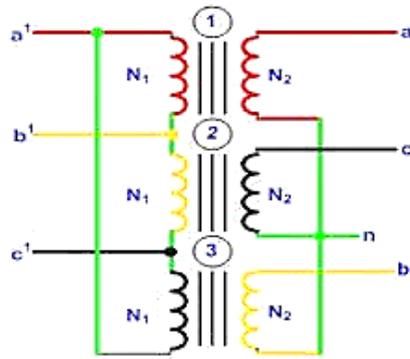


Gambar 2. 15 Hubungan Bintang-Bintang (Y-Y)

Sumber: Sumardjti, Prih, dkk. (2013)

2. Hubungan Segitiga-Bintang (Δ -Y)

Dengan Δ menghubungkan tiga kumparan primer dan Y menghubungkan tiga kumparan sekunder, hubungan bintang-segitiga (Δ –Y) ini ialah hubungan campuran.[15]

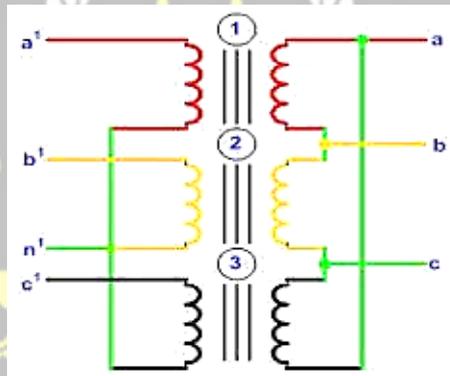


Gambar 2. 16 Hubungan Segitiga-Bintang (Δ -Y)

Sumber: Sumardjati, Prih, dkk. (2013)

3. Hubungan Bintang-Segitiga (Y- Δ)

Dengan tiga kumparan primer terhubung ke Y dan tiga kumparan sekunder terhubung ke Δ , hubungan segitiga-bintang (Y- Δ) ini ialah hubungan campuran.[15]



Gambar 2. 17 Hubungan Bintang-Segitiga (Y- Δ)

Sumber: Sumardjati, Prih, dkk. (2013)

2.2.10 Pembebanan Transformator

Transformator distribusi sebaiknya tidak menerima beban lebih dari 80%. Jika beban melebihi batas tersebut, transformator dianggap mengalami kelebihan beban (*overload*). Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa beban tetap berada dalam kisaran yang aman. Trafo mempunyai batasan-batasan dalam pengoperasiannya, apabila trafo dipakai secara terus- menerus dalam kondisi *overload* akan menyebabkan trafo menjadi panas dan kawat kumparan tidak

sanggup lagi menahan beban, sehingga timbul panas yang menyebabkan naiknya suhu kumparan tersebut[16]. Kenaikan ini menyebabkan rusaknya isolasi di kawat email di kumparan trafo, trafo akan rusak. Selain itu akan mempengaruhi kualitas daya trafo, menimbulkan rugi-rugi atau losses dan memperpendek *lifetime* atau umur trafo. Untuk menghitung arus beban penuh (*full Load*) di trafo r bisa memakai rumus berikut[17]:

$$I_{\max} = \frac{S_{\text{Trafo}}}{\sqrt{3} \times V} \quad (2.1)$$

Keterangan:

- I_{\max} = Arus beban Maksimal Trafo (A)
- V = Tegangan Primer Antar Fasa Trafo (kV)
- S_{Trafo} = Kapasitas Trafo (kVA)

Sedangkan untuk menghitung pembebanan dan persentase pembebanan transformator bisa memakai rumus dibawah ini :

$$S_{\text{Beban}} = \frac{(IR \times VR - N) + (IS \times VS - N) + (IT \times VT - N)}{1000} \quad (2.2)$$

$$\% \text{ Beban} = \frac{S_{\text{BEBAN}}}{S_{\text{Trafo}}} \times 100\% \quad (2.3)$$

Keterangan:

- I = Arus beban skunder per fasa (A)
- V = Tegangan skunder fasa-netral (V)
- S_{Beban} = Pembebanan transformator (kVA)
- S_{Trafo} = Kapasitas transformator (kVA)
- $\% \text{ Beban}$ = Persentase Pembebanan Transformator Distribusi (kVA)

Untuk menghitung besar beban arus ideal transformator sebesar 80% dari arus nominal bisa memakai rumus berikut:[13]

$$I_{\text{ideal}} = 80\% \times I_n \quad (2.4)$$

Keterangan:

- I_{ideal} = Arus Primer idealnya trafo dibeban (A)
- I_n = Arus nominal primer *nameplate* trafo (A)

Untuk menghitung persentase kelebihan beban untuk setiap fasa di transformator memakai rumus berikut:

$$R_{Lbh} = \frac{I_r - (80\% \times I_n)}{(80\% \times I_n)} \times 100\% \quad (2.5)$$

$$S_{Lbh} = \frac{I_s - (80\% \times I_n)}{(80\% \times I_n)} \times 100\% \quad (2.6)$$

$$T_{Lbh} = \frac{I_t - (80\% \times I_n)}{(80\% \times I_n)} \times 100\% \quad (2.7)$$

Keterangan:

- R_{Lbh} = Persentase Kelebihan Beban Fasa R
- S_{Lbh} = Persentase Kelebihan Beban Fasa S
- T_{Lbh} = Persentase Kelebihan Beban Fasa T
- I_R = Arus fasa R (A)
- I_S = Arus fasa S (A)
- I_T = Arus fasa T (A)
- I_n = Arus nominal primer *nameplate* trafo (A)

Perhitungan persentase jatuh tegangan : [17]

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\% \quad (2.8)$$

Keterangan :

- ΔV = Jatuh tegangan (*Drop Voltage*) (V)
- V_s = Tegangan kirim atau tegangan sekunder transformator (V)
- V_r = Tegangan terima konsumen pada ujung jaringan (V)

Jatuh tegangan (*Drop Voltage*) ialah penurunan tegangan listrik yang terjadi sepanjang penghantar akibat adanya impedansi (resistansi dan reaktansi) dalam sistem tenaga listrik. Jatuh tegangan menyebabkan tegangan di ujung beban lebih rendah dibanding tegangan sumber. Sesuai dengan SPLN T6.001:2013 standar tegangan sistem yang diterapkan pada sistem distribusi tegangan rendah ialah -10% dan +5% dari tegangan nominal [18].

Health Index yang ada pada Surat Edaran Direksi Nomer 0017.E/DIR/2014 ialah metode pemeliharaan berbasis manajemen aset [19]. *Health Index* memantau keadaan dari peralatan distribusi seperti transformator distribusi bisa dibidang

seperti *medical check-up*. Tahap pemeliharaan transformator distribusi dilaksanakan tahapan-tahapan yakni:

1. Tahapan *screening* ialah tahap pengamatan terhadap transformator yang menyeluruh atau bersifat umum terhadap fisik dari seluruh peralatan utama distribusi yang berfokus di pengumpulan data informasi dari transformator tersebut.
2. Tahapan *online assessment* ialah tahap *assessment* awal yang dilaksanakan di kondisi operasional (*online*) guna menghasilkan database kondisi terbaru atau *actual (Health Index)* untuk masing-masing peralatan utama distribusi. Di tahapan ini dibagi menjadi tahapan yang termasuk kedalam tier 1 dan tier 2:
 - a. Tier 1 ialah tahapan-1 proses pemeliharaan ditujukan untuk memeriksa kondisi lingkungan dari transformator distribusi dalam keadaan operasi (*online*).
 - b. Tier 2 ialah tahapan-2 proses pemeliharaan ditujukan untuk memeriksa kondisi internal dari transformator distribusi dalam keadaan operasi (*online*).
3. Tahapan *offline assessment* ialah tahap *assessment* lanjutan yang dilaksanakan di kondisi padam (*offline*) untuk memperoleh kondisi terbaru atau *actual (Health Index)* peralatan utama distribusi secara detail. Tahapan ini masuk kedalam tier 3 dimana tier 3 ialah tahapan-3 proses pemeliharaan *offline assessment* yang ialah tindak lanjut dari hasil tahapan *online assessment* tier 1 dan tier 2.

Untuk mengetahui *Health Index* dari transformator distribusi bisa dilihat di tabel 2.2. Di tabel tersebut berisikan tentang penilaian transformator berdasarkan hasil inspeksi secara *visual* dan di saat transformator distribusi dibebani.[19]

Tabel 2. 3 Indeks Kesehatan Transformator Distribusi SK ED PLN
No.0017.E/DIR/2014[19]

Pembagian Grup	Karakteristik	Indeks Kesehatan			
		Baik	Cukup	Kurang	Buruk
Inspeksi Visual	Kebocoran Minyak Transformator	Bersih	<i>Packing</i> retak	<i>Packing</i> retak/berminyak	Rembes/tetes
	Kondisi Fisik Transformator	Mulus	Cacat sirip minor	Cacat sirip major	Bengkok
	Pembumian	$< 1,7 \Omega$	$1,7 \Omega \leq 5 \Omega$	$5 \Omega \leq 10 \Omega$	$\geq 10 \Omega$
	Kesesuaian Ampere Fuse TR	Sesuai Standar	Deviasi 1 tingkat diatas standar	Deviasi 2 tingkat diatas standar	Fuse TR tidak ada (<i>by pass</i>)
	Kondisi PHB TR	Boks Bersih, Instalasi Rapi	Boks kotor, instalasi rapi	Boks karatan, instalasi rapi	Boks bocor, instalasi buruk
Pembacaan Pembebanan dan Profil Gardu Distribusi	Pembebanan Arus TR (% terhadap KHA)	$< 60\%$	$60\% \leq 80\%$	$80\% \leq 100\%$	$\geq 100\%$
	Ketidakseimbangan arus antar fasa	$< 10\%$	$10\% \leq 20\%$	$20\% \leq 25\%$	$\geq 25\%$
	Besar arus netral TR (% terhadap arus beban transformator)	$< 10\%$	$10\% \leq 15\%$	$15\% \leq 20\%$	$\geq 20\%$
	Pembebanan (% terhadap kapasitas)	$< 60\%$	$60\% \leq 80\%$	$80\% \leq 100\%$	$\geq 100\%$

Sumber: PT. PLN (Persero) (2014)

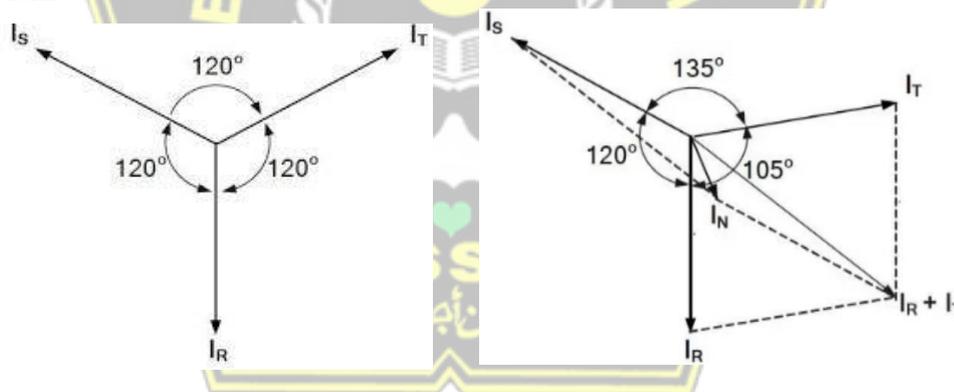
2.2.11 Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban ialah kondisi dimana terjadi salah satu atau semua fasa transformator mengalami perbedaan, perbedaan yang dimaksud ialah dilihat dari besarnya vektor arus atau tegangan dan sudut dari tiap fasa tersebut[3]. Keadaan seimbang bisa dilihat dalam keadaan dimana:

- Ketiga vektor arus atau tegangan sama besar.
- Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain.

Keadaan tidak seimbang bisa dilihat ketika salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang diatas tidak terpenuhi. Dengan kemungkinan keadaan tidak seimbang bisa dilihat dalam keadaan dimana:[20]

- Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.



Gambar 2. 18 Vektor Diagram Arus

Sumber: Ardilla Meita (2019)

Gambar sebelah kiri menunjukkan keadaan seimbang dari vektor arus, terlihat penjumlahan ketiga vektor arus tersebut ialah sama dengan nol, sehingga arus di arus netral tidak muncul. Gambar sebelah kanan menunjukkan keadaan tidak seimbang dari vektor arus, terlihat penjumlahan ketiga vektor arus tersebut tidak sama dengan nol, sehingga muncul arus di netral yang besarnya bergantung dari besar vektor ketidakseimbangannya. Sebagai contoh daya P disalurkan melalui

saluran dengan penghantar netral. Untuk menghitung arus rata-rata ketiga fasa bisa memakai persamaan rumus yakni:

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (2.9)$$

Apabila penyaluran daya, arus-arus fasanya dalam keadaan seimbang, maka nilai besar daya tersebut bisa dinyatakan dalam rumus berikut:

$$P = V \times I \times \cos \varphi \quad (2.10)$$

Keterangan:

P = Daya aktif (W)

V = Tegangan fasa-netral transformator (V)

I = Arus fasa (A)

$\cos \varphi$ = Faktor daya

Sedangkan I ialah besaran arus fasa dalam penyaluran daya sebesar P di saat keadaan seimbang, maka penyaluran daya yang sama namun dalam keadaan tidak seimbang besar arus tiap fasanya bisa dinyatakan koefisien a, b dan c sama dengan 1 dalam keadaan seimbang, perumusan yakni:

$$\begin{aligned} I_R &= a \times I \\ I_S &= b \times I \\ I_T &= c \times I \end{aligned} \quad (2.11)$$

Dimana dalam keadaan arus beban antar fasa sama atau seimbang, maka koefisien a, b dan c dinyatakan yakni

$$a=b=c=1 \quad (2.12)$$

Keterangan:

a = koefisien keseimbangan arus beban fasa R

b = koefisien keseimbangan arus beban fasa S

c = koefisien keseimbangan arus beban fasa T

Koefisien a, b dan c bisa diperoleh nilai besarnya, besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama besarnya dengan arus rata-rata, bisa dirumuskan yakni:

$$I_R = a \times I_{\text{rata-rata}}, \text{ maka } a = \frac{I_R}{I_{\text{rata-rata}}} \quad (2.13)$$

$$I_S = b \times I_{rata-rata}, \text{ maka } b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \quad (2.14)$$

$$I_T = c \times I_{rata-rata}, \text{ maka } c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \quad (2.15)$$

Dalam keadaan seimbang nilai besaran koefisien a, b dan c ialah 1, sehingga rata-rata ketidakseimbangan beban yang dituangkan dalam persentase bisa dirumuskan yakni:

$$KS = \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100 \% \quad (2.16)$$

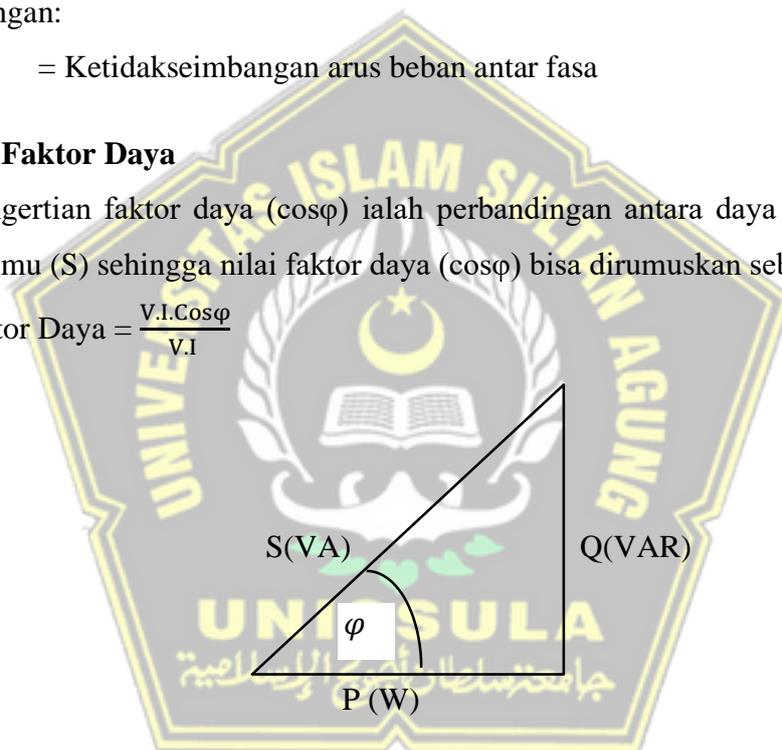
Keterangan:

KS = Ketidakseimbangan arus beban antar fasa

2.2.12 Faktor Daya

Pengertian faktor daya ($\cos\phi$) ialah perbandingan antara daya aktif (P) dan daya semu (S) sehingga nilai faktor daya ($\cos\phi$) bisa dirumuskan sebagai:

$$\text{Faktor Daya} = \frac{V.I.\cos\phi}{V.I} \quad (2.17)$$



Gambar 2. 19 Segitiga Daya

Sumber: Susanto, M.Randi dan Wahyu (2020)

Penjelasan daya-daya bisa dilihat di gambar segitia daya. Untuk mencari nilai dari daya- daya di segitia diatas bisa memakai rumus yakni:[8]

$$S = V. I \quad (2.18)$$

$$P = V. I. \cos \phi \quad (2.18)$$

$$Q = V. I. \sin \phi \quad (2.20)$$

Keterangan:

S = Daya semu (VA)

P = Daya aktif (W)

Q = Daya reaktif (VAR)

2.2.13 Hukum Kirchoff

Hukum Kirchoff, yang dirumuskan oleh fisikawan Jerman Gustav Robert Kirchoff, mencakup dua prinsip dasar: Hukum Arus Kirchoff (KCL) dan Hukum Tegangan Kirchoff (KVL). Hukum-hukum ini berfungsi sebagai alat penting untuk menganalisis rangkaian listrik, yang memungkinkan penentuan arus listrik yang mengalir melalui setiap segmen rangkaian.[21]

1. Hukum pertama Kirchoff ialah hukum yang berlaku pada rangkaian cabang dan menyangkut arah arus listrik saat melewati suatu titik cabang. Hukum pertama Kirchoff disebut juga dengan hukum arus Kirchoff (KCL). Bunyi hukum pertama Kirchoff ialah “Jumlah arus listrik total yang masuk ke suatu titik cabang sama dengan jumlah arus total yang keluar dari titik cabang tersebut pada rangkaian listrik.” Berdasarkan penafsiran tersebut, maka bisa dinyatakan yakni:[21]

$$\sum I \text{ masuk} = \sum I \text{ Keluar} \quad (2.21)$$

$$I_{\text{total}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

2. Hukum Kirchoff II ialah hukum yang berlaku pada rangkaian tak bercabang dan dipakai untuk menganalisis beda potensial atau tegangan pada rangkaian tertutup. Hukum Kirchoff II disebut juga dengan Hukum Tegangan Kirchoff (KVL). Bunyi Hukum Kirchoff II ialah: “Beda potensial atau tegangan total pada rangkaian tertutup sama dengan nol.” Berdasarkan penjelasan tersebut, maka bisa dirumuskan yakni:[21]

$$\sum \mathcal{E} + \sum IR = 0 \quad (2.22)$$

$$V_{ab} + V_{bc} + V_{cd} + V_{da} = 0$$

2.2.14 Metode-Metode Mengatasi Transformator *Overload*

Masalah *overload* ialah masalah yang harus segera diatasi agar transformator tidak mengalami kerusakan yang signifikan serta memberikan kerugian bagi PLN. Beberapa metode yang dipakai untuk mengatasi transformator *overload* yakni[22]:

1. Metode *Uprating* atau tambah kapasitas transformator

Menambah kapasitas transformator dimaksudkan yakni mengganti transformator yang lama dengan transformator yang kapasitasnya lebih tinggi. sebagai contoh transformator 50 kVA yang sudah mengalami *overload* diganti dengan transformator 100 kVA sehingga pembebanannya bisa berkurang. Yang perlu diperhatikan dalam melaksanakan metode ini yakni melihat dari segi kontruksi gardu tersebut, maksudnya jika diharuskan untuk melaksanakan penggantian kontruksi dari gardu tersebut sebelum di *uprating*, misalnya dari gardu satu tiang menjadi gardu portal maka perlu biaya pengadaan bangun kontruksi gardu baru, ditambah biaya pengadaan transformator baru dan jasa pekerjaannya. Biaya-biaya tersebut harus dipertimbangkan sebelum dilaksanakan penggantian dengan melihat pembebanan daerah tersebut kedepannya agar bisa memberikan keuntungan dalam jangka panjang.

2. Metode sisip transformator

Sisip transformator dimaksudkan ialah membangun gardu baru di dekat gardu yang mengalami *overload*, sehingga beban bisa dialihkan ke gardu baru yang sudah dibangun, metode ini umum dilaksanakan untuk mengatasi gardu *overload*. Yang perlu diperhatikan dalam melaksanakan metode ini yakni biaya pengadaan bangun gardu, biaya pengadaan transformator, biaya jasa pekerjaan serta yang penting yakni perijinan dari pihak setempat terkait penggunaan lahan tersebut untuk dibangun gardu baru atau sisip transformator.

3. Metode pindah kopel jurusan transformator

Metode ini memanfaatkan JTR jurusan lain dengan manuver sebagian beban transformator *overload* ke jurusan transformator lain yang terdekat yang dalam keadaan beban rendah. Yang perlu diperhatikan dari metode ini yakni biaya yang ekonomis dan paling sedikit dibanding metode lainnya, dimana hanya memerlukan

biaya jasa dalam pemindahan beban tersebut. Metode ini biasanya diambil sebagai langkah jika syarat-syarat dalam metode yang lain tidak terpenuhi.

2.2.15 Perawatan Transformator

Dalam jaringan distribusi tenaga listrik, trafo distribusi memiliki fungsi yang sangat penting. Trafo ini ialah komponen penting yang memfasilitasi penyaluran listrik yang aman, efisien, dan andal dari gardu induk ke pengguna akhir. Untuk memastikan keandalannya, sangat penting untuk menerapkan pemeliharaan rutin dan praktik operasional yang optimal. Pendekatan ini menjamin distribusi energi listrik yang konsisten dan mempertahankan layanan listrik yang tidak terputus bagi konsumen selama beberapa tahun mendatang.[19]

Penyebab Gangguan Transformator Distribusi

A. *Eksternal*: gangguan yang disebabkan diluar sistem jaringan distribusi

1. Sambaran Petir, Terjadinya sambaran petir pada jaringan distribusi bisa menimbulkan tegangan lebih yang bisa membahayakan komponen pelindung transformator distribusi, yang mengakibatkan kerusakan isolasi dan potensi terjadinya korsleting.
2. *Flash Over*, Fenomena ini terjadi akibat lengkungnya listrik antara konduktor dan casing transformator distribusi, yang mengakibatkan hubungan pendek antara fasa dan tanah akibat tingginya level tegangan.
3. Hubung Singkat, Fenomena ini terjadi saat kontaminan dan kelembapan terakumulasi pada bushing, sehingga memudahkan penghantaran arus listrik dari bushing ke badan transformator distribusi.

B. *Internal*: gangguan yang disebabkan di dalam sistem jaringan distribusi

1. *Overload* dan beban tidak seimbang, Fenomena ini muncul saat trafo distribusi beroperasi pada kapasitas beban penuh. Idealnya, beban trafo harus berada dalam kisaran 20% hingga 80% dari kapasitas terpasang untuk mempertahankan kinerja optimal. Pengoperasian yang lama di luar kisaran yang disarankan ini bisa menyebabkan peningkatan suhu di dalam lilitan trafo distribusi, yang pada akhirnya mengakibatkan degradasi isolasi di sekitar lilitan tersebut.

2. *Loss Contact*, Terjadi karena pemasangan terminal bushing yang tidak cukup kencang, menghasilkan ketidakstabilan aliran listrik dan titik panas yang merusak lilitan transformator.
3. Kegagalan isolasi minyak transformator distribusi terjadi akibat kebocoran pengepakan dan penuaan minyak, yang mengakibatkan kekuatan dielektrik minyak transformator menurun.

Jenis Perawatan Transformator Distribusi[19]

1. Pemeriksaan saat operasi, observasi langsung terhadap kondisi transformator distribusi ketika sedang beroperasi, dengan tujuan mendeteksi potensi anomali di dalamnya.
2. Pengukuran saat operasi, melibatkan pengukuran dan pengujian transformator distribusi ketika sedang beroperasi. Dari pengujian ini, analisis awal mengenai tanda-tanda kerusakan atau kelainan pada transformator bisa diperoleh.
3. Perawatan *Preventif*, jenis perawatan ini dilaksanakan dengan meramalkan umur pakai komponen transformator dan komponen pendukungnya. Hal ini memungkinkan deteksi dini gejala kerusakan komponen dan pencegahan pemadaman listrik.
4. Perawatan *Prediktif*, dilaksanakan dengan memprediksi kondisi komponen transformator melalui observasi terhadap gejalanya. Sesudah perawatan ini dilaksanakan, analisis tentang tanda-tanda kerusakan dan estimasi waktu kegagalan komponen bisa diperoleh.
5. Perbaikan *Korektif*, dilaksanakan ketika komponen transformator mengalami penurunan kinerja atau kelainan. Tujuannya ialah untuk memulihkan performa komponen tersebut.
6. Perbaikan Akibat Gangguan, jenis perawatan ini dilaksanakan secara mendadak sebagai respons terhadap kegagalan fungsi komponen yang bersifat darurat.

2.2.16 Asumsi Pertumbuhan Pembebanan

Untuk Mengetahui persentase konsumsi energi listrik selama beberapa tahun kedepan, memakai data konsumsi energi listrik selama beberapa tahun kebelakang, bisa dihitung memakai rumus yakni:[22]

$$PB = \frac{KEL_n - KEL_p}{KEL_p} \times 100\% \quad (2.23)$$

Dilanjutkan menghitung rata-rata pertumbuhan beban selama beberapa tahun sebelumnya memakai rumus yakni:

$$\text{Rata - rata KEL} = \frac{(n+(n+1)+(n+2)+(n+3)+\dots\text{dst})}{Y_n} \quad (2.24)$$

Selanjutnya pertumbuhan penjualan energi listrik selama beberapa tahun kedepan bisa dihitung memakai rumus yakni:[22]

$$PB(n) = \% \text{ Beban ke } (n - 1) + \text{Rata}^2 \text{ KEL} \times S \text{ Beban ke } (n - 1) \quad (2.25)$$

Keterangan:

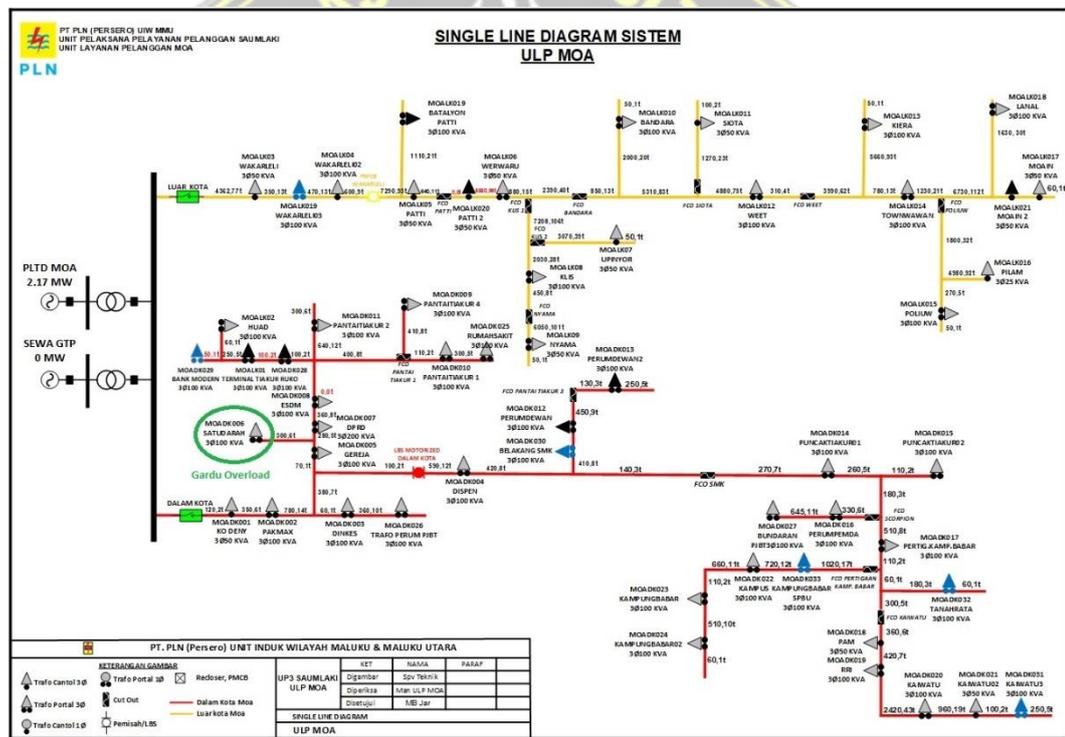
- PB = Persentase kenaikan beban dari tahun sebelumnya
- PB_(n) = Prediksi persentase kenaikan beban tahun kedepannya
- n = Pertumbuhan Pembebanan tahun ke n
- Y_n = Jumlah tahun
- KEL_n = Penjualan tahun ke n
- KEL_p = Penjualan tahun ke n-1

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Studi ini dilaksanakan di Kabupaten Maluku Barat Daya, lebih spesifiknya di Kecamatan Moa yang dimana ialah area kerja PT. PLN (Persero) ULP Moa, pada daerah penyulang dalam kota dan salah satu gardu di area penyulang dalam kota ada gardu yang mengalami *overload* yakni gardu dengan nomor MOADK006 yang transformatornya berkapasitas 100 kVA dengan pembebanan lebih dari 80% dari kapasitasnya, maka dari itu dilaksanakannya penambahan Transformator sisipan guna mengatasi permasalahan *Overload* tersebut.



Gambar 3. 1 Gambar SLD Sisi 20 kV

Sumber: PT. PLN (Persero) ULP Moa (2024)



Gambar 3. 2 PLTD Moa
Sumber: PT. PLN (Persero) ULP Moa (2024)



Gambar 3. 3 Kantor PT. PLN (Persero)ULP Moa
Sumber: PT. PLN (Persero) ULP Moa (2024)

3.2 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 4 Diagram *Flowchart* Perencanaan Penelitian

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

Adapun bahan dan alat penelitian untuk pengambilan data Tugas Akhir ialah:

- a. Seperangkat laptop
- b. Aplikasi Website ManTra (Manajemen Trafo)
- c. Handphone
- d. Tang Ampere atau AVO Meter
- e. Alat tulis dan kertas
- f. Alat Pelindung Diri

3.4 Prosedur Pengumpulan Data

Adapun metode yang dipakai dalam pengumpulan data untuk Tugs Akhir ini ialah yakni:

1. Metode Observasi

Ialah metode yang dipakai untuk memperoleh data-data pengamatan *visual* secara langsung kondisi di lapangan dengan melaksanakan survei. Gardu distribusi terkait yang akan dibahas dalam penulisan tugas akhir ini khususnya di Gardu Distribusi MOADK006 yang *overload* dan akan akan dilaksanakan penambahan Gardu Distribusi Sisipan.

2. Metode Wawancara

Ialah metode yang dipakai untuk mencari dan mengumpulkan data dengan memperoleh materi-materi ataupun penjelasan serta tanya-jawab atau wawancara secara langsung dengan pihak yang berkompeten dibidangnya baik itu dengan bimbingan maupun diskusi dengan pihak PT. PLN (Persero) yang khususnya berkompeten dibidangnya mengenai permasalahan yang diangkat di Tugas Akhir.

3. Metode Dokumentasi

Ialah metode yang dipakai dalam melengkapi penyusunan Tugas Akhir berupa dokumen-dokumen yang berbentuk tulisan, gambar, foto, diagram ataupun karya-karya tulis dari orang lain. Dokumentasi terhadap gardu distribusi MOADK006.

4. Metode Studi Literatur

Ialah metode yang dipakai untuk memperoleh teori-teori penunjang serta referensi yang memuat rumus-rumus yang berguna dalam perhitungan terkait permasalahan yang diambil. Referensi-referensi yang dimaksud yakni bisa diambil dari buku PLN, SPLN, buku *offline* ataupun *online* dan lain sebagainya yang nantinya dijadikan sumber pustaka dalam penulisan Tugas Akhir ini.

3.5 Tahapan Penelitian

Adapun tahapan penelitian Tugas Akhir ini ialah yakni[23]:

1. Studi Literatur

Mempelajari teori-teori penunjang serta referensi yang memuat rumus-rumus yang berguna dalam perhitungan terkait permasalahan yang diambil. Referensi-referensi yang dimaksud yakni bisa diambil dari buku PLN, SPLN, buku *offline* ataupun *online* dan lain sebagainya yang nantinya dijadikan sumber pustaka dalam penulisan Tugas Akhir ini.

2. Observasi

Mengobservasi data-data pengamatan *visual* secara langsung kondisi di lapangan dengan melaksanakan survei. Gardu distribusi terkait yang akan dibahas dalam penulisan tugas akhir ini khususnya di Gardu Distribusi MOADK006 (*overload*) yang akan dilaksanakan penambahan Gardu Distribusi Sisipan.

3. Pengambilan Data

Memperoleh data dengan cara pengukuran secara langsung di gardu distribusi MOADK006 (*overload*) yang sebelumnya sudah memperoleh ijin dan alat ukur dari pihak PT. PLN (Persero) untuk melaksanakan pengukuran pada gardu tersebut. Pengukuran dilaksanakan pada dua titik waktu yakni Siang hari saat Luar Waktu Beban Puncak (LWBP) dan Malam hari saat Waktu Beban Puncak (WBP).

4. Pengolahan Data

Sesudah data-data diperoleh secara lengkap, kemudian mengolah data dengan memakai rumus perhitungan untuk memperoleh persentase pembebanan trafo dan persentase kelebihan beban trafo sebelum dan sesudah penambahan Gardu Distribusi Sisipan.

5. Teknik Analisis Data

Menganalisis hasil perhitungan pembebanan transformator dengan membandingkan sebelum dan sesudah dilaksanakan penambahan Gardu Distribusi Sisipan, menganalisis hasil pembebanan sudah dibawah 80% dari kapasitas transformator sesuai dengan standar yang berlaku, serta menganalisis faktor yang bisa mempengaruhi transformator bisa mengalami keadaan *overload*. Dilanjutkan dengan membuat kesimpulan dari hasil penelitian tersebut.

3.6 Metode Pengolahan Data

Berdasarkan permasalahan Tugas Akhir yang akan dibahas, dipakai rumus-rumus berikut untuk menganalisis data yang diperoleh:

1. Menghitung persentase pembebanan transformator di gardu distribusi MOADK006 Penyulang Dalam Kota sebelum Penambahan Gardu Sisipan dengan memakai rumus 2.2 dan 2.3 berikut :

$$S_{\text{BEBAN}} = \frac{(I_R \times V_{R-N}) + (I_S \times V_{S-N}) + (I_T \times V_{T-N})}{1000}$$

$$\% \text{ Beban} = \frac{S_{\text{Beban}}}{S_{\text{Trafo}}} \times 100\%$$

2. Menghitung besar beban arus ideal transformator sebesar 80% dari arus nominal di nameplate transformator 100 kVA gardu distribusi MOADK006 Penyulang Dalam Kota dengan memakai rumus 2.4 berikut :

$$I_{\text{Ideal}} = 80\% \times I_n$$

3. Menghitung persentase kelebihan beban untuk setiap fasa di transformator gardu distribusi MOADK006 Penyulang Dalam Kota dengan memakai rumus 2.5, 2.6, dan 2.7 berikut :

$$R_{\text{Lbh}} = \frac{I_r - (80\% \times I_n)}{(80\% \times I_n)} \times 100\%$$

$$S_{Lbh} = \frac{I_s - (80\% \times I_n)}{(80\% \times I_n)} \times 100\%$$

$$T_{Lbh} = \frac{I_t - (80\% \times I_n)}{(80\% \times I_n)} \times 100\%$$

4. Menghitung persentase ketidakseimbangan beban gardu MOADK006 Penyulang Dalam Kota sebelum penambahan Gardu Distribusi sisipan memakai rumus 2.9, 2.13 2.14, 2.15 dan 2.16 berikut :

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

$$I_R = a \times I_{rata-rata}, \text{ maka } a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}}$$

$$I_S = b \times I_{rata-rata}, \text{ maka } b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}}$$

$$I_T = c \times I_{rata-rata}, \text{ maka } c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}}$$

$$KS = \frac{\{|a-1| + |b-1| + |c-1|\}}{3} \times 100\%$$

5. Menghitung persentase jatuh tegangan (*drop Voltage*) pada ujung jaringan di gardu distribusi MOADK006 Penyulang Dalam Kota sebelum Penambahan Gardu Sisipan dengan memakai rumus 2.8 berikut :

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

6. Menghitung persentase pembebanan transformator di gardu distribusi MOADK006 Penyulang Dalam Kota sudah penambahan Gardu Distribusi sisipan dengan memakai rumus 2.2 dan 2.3 berikut:

$$S_{\text{BEBAN}} = \frac{(I_R \times V_{R-N}) + (I_S \times V_{S-N}) + (I_T \times V_{T-N})}{1000}$$

$$\% \text{ Beban} = \frac{S_{\text{Beban}}}{S_{\text{Trafo}}} \times 100\%$$

7. Menghitung persentase ketidakseimbangan beban gardu MOADK006 Penyulang Dalam Kota sebelum penambahan Gardu Distribusi sisipan memakai rumus 2.9, 2.13 2.14, 2.15 dan 2.16 berikut :

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

$$I_R = a \times I_{rata-rata}, \text{ maka } a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}}$$

$$I_S = b \times I_{rata-rata}, \text{ maka } b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}}$$

$$I_T = c \times I_{rata-rata}, \text{ maka } c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}}$$

$$KS = \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\%$$

8. Menghitung persentase jatuh tegangan (*drop Voltage*) pada ujung jaringan di gardu distribusi MOADK006 Penyulang Dalam Kota sesudah Penambahan Gardu Sisipan dengan memakai rumus 2.8 berikut :

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

9. Menghitung estimasi pertumbuhan beban selama beberapa tahun kedepan, berdasarkan data konsumsi energi listrik ULP Moa selama 5 tahun kebelakang memakai rumus yakni :

$$PB = \frac{KEL_n - KEL_p}{KEL_p} \times 100\%$$

$$\text{Rata - rata KEL} = \frac{(n+(n+1)+(n+2)+(n+3)+\dots+dst)}{Y_n}$$

$$PB(n) = \% \text{ Beban ke } (n - 1) + \text{Rata}^2 \text{ KEL} \times S \text{ Beban ke } (n - 1)$$

10. Penempatan Transformator Sisipan

Perhitungan penempatan transformator sisipan bisa dihitung dengan rumus berikut:

$$L = \frac{10\% \times VF - F}{I_{rata-rata} \times R \text{ saluran}}$$

Keterangan:

I = Arus beban (A)

S_{Beban} = Pembebanan transformator (kVA)

S_{Trafo} = Kapasitas transformator (kVA)

I_n = Arus Nominal Transformator (A)

I_R = Arus fasa R (A)

I_S = Arus fasa S (A)

I_T = Arus fasa T (A)

V = Tegangan skunder fasa-netral transformator (V)

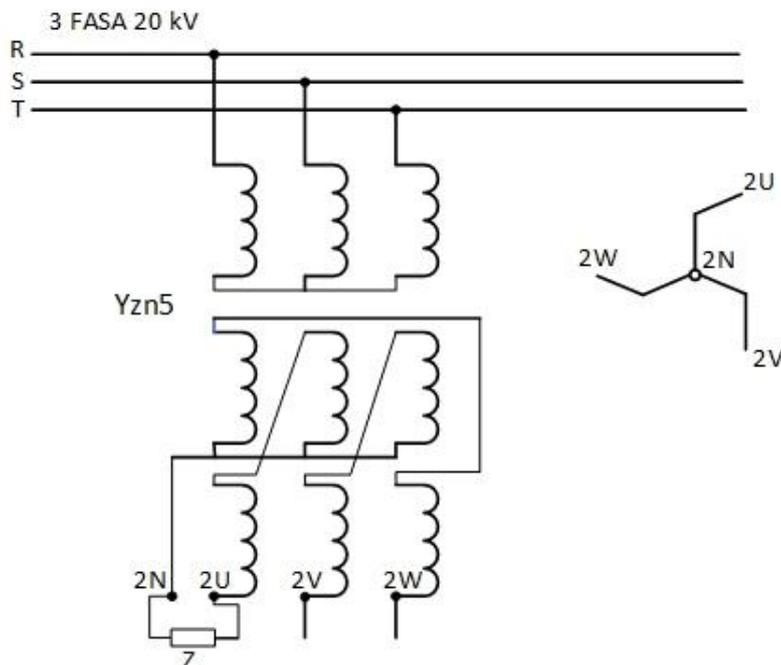
R_{Lbh} = Persentase Kelebihan Beban Fasa R

S_{Lbh} = Persentase Kelebihan Beban Fasa S

T_{Lbh} = Persentase Kelebihan Beban Fasa T

KS	= Ketidakseimbangan arus beban antar fasa
ΔV	= Jatuh tegangan (<i>Drop Voltage</i>) (V)
V_s	= Tegangan kirim / tegangan sekunder transformator (V)
V_r	= Tegangan terima konsumen pada ujung jaringan (V)
PB	= Persentase kenaikan beban dari tahun sebelumnya
PB(n)	= Prediksi persentase kenaikan beban tahun kedepannya
n	= Tahun ke n
Y_n	= Jumlah Tahun
KEL _n	= Penjualan tahun ke n
KEL _p	= Penjualan tahun ke n-1
L	= Jarak Trafo sisipan dipasang terhadap Gardu Utama (km)
V_{F-F}	= Tegangan fasa – fasa sisi sekunder trafo (V)
$I_{rata-rata}$	= Arus rata-rata sisi sekunder trafo (A)
$R_{Saluran}$	= Resistansi Penghantar (Ω/km)

3.7 Gambar SLD Pemasangan Penambahan Transformator Sisipan



Gambar 3. 5 Gambar SLD Pemasangan Penambahan Transformator Sisipan

BAB IV

HASIL DAN ANALISIS

4.1 Hasil Penelitian

4.1.1 Data Spesifikasi dan Nameplate Transformator Gardu Distribusi MOADK006

Gardu distribusi MOADK006 berada di Penyulang Dalam Kota dengan kapasitas 100 kVA berlokasi di Desa Wakarleli, Kecamatan Moa, Kabupaten Maluku Barat Daya, Maluku. Gardu distribusi MOADK006 di suplai oleh PLTD MOA yang berada di wilayah kerja PT.PLN (Persero) ULP Moa. Gardu distribusi MOADK006 memiliki spesifikasi teknis di tabel 4.1 yakni

Tabel 4. 1 Spesifikasi Gardu Distribusi MOADK006

No	Uraian	Infomasi dan Spesifikasi
1	Nomor Gardu	MOADK006
2	Lokasi	Desa Wakarleli, Moa
3	Penyulang	Dalam Kota
4	Gardu Induk/Pembangkit	PLTD MOA
5	Merk	VOLTRA
6	Standar	SPLN D3.002-1:2007
7	Fase Tegangan	3 Fasa
8	Tipe Konstruksi	Gardu Portal
9	No. Seri	170802B1746A
10	Frekuensi	50 Hz
11	Tahun Pembuatan	2010
12	Daya Nominal	100 kVA
13	Vektor Hubungan	Yzn5
14	Tegangan Nominal	
	a. Primer	20.000 V
	b. Skunder	400 V

15	Arus Nominal	
	a. Primer	2,89 A
	b. Skunder	144,34 A
16	Impedansi	4 %
17	Cara Pendinginan	ONAN
18	Tingkat Isolasi Dasar	125 kV
19	Jumlah Berat	712 kg
20	Volume Minyak	210 kg

Sumber: ManTra (Manajemen Gardu Distribusi Terintegrasi) PT.PLN
(Persero) ULP Moa (2024)

4.1.2 Data Hasil Pengecekan Visual Gardu Distribusi MOADK006

Dari observasi yang sudah dilaksanakan pada saat dilapangan di Gardu Distribusi MOADK006 dengan melakukan pengamatan *visual* secara langsung diperoleh beberapa data sesuai Tabel 4.2 berikut:

Tabel 4. 2 Data Hasil Pengecekan Visual Gardu Distribusi MOADK006

No	Indikator Pengecekan	Hasil Pengecekan
1	Kebocoran Minyak transformator	Bersih, Tidak ada kebocoran
2	Kondisi Fisik	Mulus
3	Kondisi Panel Hubung Bagi TR	Bersih, instalasi Rapi
4	Kesesuaian Ampere Fuse TR	Sesuai standar

4.1.3 Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan

Untuk memperoleh data pembebanan di gardu distribusi MOADK006, dilaksanakan pengukuran beban di gardu tersebut selama 1 hari pada hari Kamis, tanggal 24 Oktober 2024. Pengukuran dilaksanakan sebelum dilaksanakannya penambahan Transformator sisipan pada dua titik waktu yakni LWBP siang hari dimulai sekitar pukul 12.00, 13.00 dan 14.00 WIT dan WBP pada malam hari dimulai sekitar pukul 18.00, 19.00 dan 20.00 WIT. Kemudian hasil pengukuran di gardu distribusi MOADK006 ditampilkan di tabel 4.3 dan 4.4 berikut:

Tabel 4. 3 Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran LWBP

Tanggal	Waktu (WIT)	Fasa	Arus Induk (A)	Arus Jurusan (A)		Tegangan Induk (V)			Tegangan Ujung (V)		
				A	B	R-N	R-S	S-T	R-N	S-N	T-N
Kamis, 24 Oktober 2024	12	R	138	54.74	83.26	R-N	226	R-S	386	R-N	206
		S	110.9	60.59	50.31	S-N	226	S-T	385	S-N	208
		T	95.7	42.88	52.82	T-N	225	T-R	386	T-N	209
	13	R	144	57.08	86.92	R-N	226	R-S	386	R-N	205
		S	113	61.77	51.23	S-N	225	S-T	385	S-N	208
		T	98	43.87	54.13	T-N	226	T-R	386	T-N	209
	14	R	141	55.9	85.1	R-N	225	R-S	386	R-N	205
		S	113	61.91	51.09	S-N	224	S-T	385	S-N	208
		T	96.4	43.18	53.22	T-N	225	T-R	386	T-N	208

Sumber: PT.PLN (Persero) ULP Moa (2024)

Tabel 4. 4 Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran WBP

Tanggal	Waktu (WIT)	Fasa	Arus Induk (A)	Arus Jurusan (A)		Tegangan Induk (V)			Tegangan Ujung (V)		
				A	B	R-N	R-S	S-T	R-N	S-N	T-N
Kamis, 24 Oktober 2024	18	R	153	60.65	92.35	R-N	226	R-S	386	R-N	206
		S	110	60.13	49.87	S-N	226	S-T	386	S-N	207
		T	98.4	44.05	54.35	T-N	225	T-R	385	T-N	209
	19	R	168	66.61	101.4	R-N	225	R-S	386	R-N	206
		S	120	65.75	54.25	S-N	224	S-T	385	S-N	208
		T	109	48.83	60.17	T-N	225	T-R	386	T-N	209
	20	R	177.4	70.7	106.7	R-N	225	R-S	385	R-N	205
		S	123.6	69.7	53.9	S-N	224	S-T	385	S-N	207
		T	116.1	50	66.1	T-N	225	T-R	385	T-N	208

Sumber: PT.PLN (Persero) ULP Moa (2024)

4.1.4 Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 dan Gardu Distribusi Sisipan Sesudah Penambahan Transformator Sisipan

Untuk memperoleh data pembebanan di gardu distribusi MOADK006, dilaksanakan pengukuran beban di gardu tersebut selama 1 hari pada hari Selasa, tanggal 12 November 2024. Pengukuran dilaksanakan sesudah dilaksanakannya penambahan Transformator sisipan pada dua titik waktu yakni LWBP siang hari dimulai sekitar pukul 12.00, 13.00 dan 14.00 WIT dan WBP pada malam hari dimulai sekitar pukul 18.00, 19.00 dan 20.00 WIT.

Hasil pengukuran gardu distribusi MOADK006 ditampilkan di tabel 4.5 dan 4.6 berikut:

Tabel 4. 5 Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran LWBP

Tanggal	Waktu (WIT)	Fasa	Arus Induk (A)	Arus Jurusan (A)		Tegangan Induk (V)			Tegangan Ujung (V)		
				A	B						
Selasa, 12 Novem ber 2024	12	R	55.94	22.18	33.76	R-N	221	R-S	384	R-N	215
		S	70.63	38.58	32.05	S-N	222	S-T	385	S-N	214
		T	38.47	17.23	21.24	T-N	221	T-R	384	T-N	217
	13	R	56.15	22.25	33.9	R-N	222	R-S	384	R-N	216
		S	73.97	40.43	33.54	S-N	222	S-T	384	S-N	216
		T	42.23	18.9	23.33	T-N	222	T-R	384	T-N	217
	14	R	54.15	21.46	32.69	R-N	223	R-S	385	R-N	217
		S	71.71	39.28	32.43	S-N	222	S-T	384	S-N	215
		T	41.47	18.57	22.9	T-N	222	T-R	384	T-N	216

Sumber: PT.PLN (Persero) ULP Moa (2024)

Tabel 4. 6 Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran WBP

Tanggal	Waktu (WIT)	Fasa	Arus Induk (A)	Arus Jurusan (A)		Tegangan Induk (V)				Tegangan Ujung (V)	
				A	B						
Selasa, 12 Novem ber 2024	18	R	55.15	21.86	33.29	R-N	222	R-S	384	R-N	216
		S	73.97	40.43	33.54	S-N	222	S-T	384	S-N	215
		T	42.23	18.9	23.33	T-N	222	T-R	384	T-N	216
	19	R	58.71	23.27	35.44	R-N	222	R-S	384	R-N	215
		S	78.67	43.1	35.57	S-N	221	S-T	383	S-N	215
		T	44.51	19.93	24.56	T-N	222	T-R	385	T-N	215
	20	R	64.58	25.6	38.98	R-N	222	R-S	384	R-N	216
		S	88.17	48.31	39.86	S-N	221	S-T	384	S-N	214
		T	50.43	22.59	27.84	T-N	222	T-R	385	T-N	217

Sumber: PT.PLN (Persero) ULP Moa (2024)

Hasil pengukuran gardu distribusi sisipan ditampilkan di tabel 4.7 dan 4.8 berikut:

Tabel 4. 7 Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi Sisipan Saat Pengukuran LWBP

Tanggal	Waktu (WIT)	Fasa	Arus Induk (A)	Arus Jurusan (A)		Tegangan Induk (V)				Tegangan Ujung (V)	
				A	B						
Selasa, 12 Novem ber 2024	12	R	80.8	32.05	48.75	R-N	222	R-S	385	R-N	214
		S	44.31	24.21	20.1	S-N	222	S-T	385	S-N	216
		T	59.74	26.77	32.97	T-N	222	T-R	385	T-N	215
	13	R	82.34	32.64	49.7	R-N	221	R-S	384	R-N	214
		S	45.88	25.08	20.8	S-N	222	S-T	384	S-N	216
		T	61.9	27.71	34.19	T-N	222	T-R	384	T-N	215
	14	R	81.55	32.33	49.22	R-N	223	R-S	385	R-N	216
		S	43.64	23.91	19.73	S-N	222	S-T	384	S-N	215
		T	60.37	27.04	33.33	T-N	222	T-R	384	T-N	215

Sumber: PT.PLN (Persero) ULP Moa (2024)

Tabel 4. 8 Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi Sisipan Saat Pengukuran WBP

Tanggal	Waktu (WIT)	Fasa	Arus Induk (A)	Arus Jurusan (A)		Tegangan Induk (V)			Tegangan Ujung (V)		
				A	B						
Selasa, 12 Novem ber 2024	18	R	82.93	33.27	50.66	R-N	222	R-S	384	R-N	214
		S	47.77	25.57	21.2	S-N	221	S-T	383	S-N	216
		T	62.12	27.81	34.31	T-N	222	T-R	385	T-N	215
	19	R	88.43	35.46	53.97	R-N	222	R-S	384	R-N	214
		S	50.73	28.34	25.39	S-N	221	S-T	383	S-N	216
		T	64.64	28.96	35.68	T-N	222	T-R	385	T-N	215
	20	R	94.72	37.75	56.97	R-N	222	R-S	385	R-N	213
		S	55.65	31.38	24.27	S-N	222	S-T	385	S-N	215
		T	69.19	29.8	39.39	T-N	223	T-R	386	T-N	215

Sumber: PT.PLN (Persero) ULP Moa (2024)

4.2 Pembahasan

4.2.1 Perhitungan Persentase Pembebanan Transformator Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan

Berdasarkan tabel 4.3 dan 4.4 data hasil pengukuran pembebanan gardu distribusi MOADK006 yang diukur pada tanggal 24 Oktober 2024 waktu LWBP dan WBP, pembebanan serta persentase pembebanan transformator MOADK006 bisa diperoleh dengan persamaan rumus 2.2 dan persamaan rumus 2.3 yakni:

$$S_{\text{BEBAN}} = \frac{(IR \times VR - N) + (IS \times VS - N) + (IT \times VT - N)}{1000}$$

$$\text{Persentase Pembebanan} = \frac{S_{\text{BEBAN}}}{S_{\text{TRAFO}}} \times 100\%$$

Dari perumusan tersebut maka bisa dihitung pembebanan transformator di tanggal 24 Oktober 2024 pukul 20.00 WIT yakni:

$$S_{\text{BEBAN}} = \frac{(IR \times VR - N) + (IS \times VS - N) + (IT \times VT - N)}{1000}$$

$$S_{\text{BEBAN}} = \frac{(177.4 \times 225) + (123,6 \times 224) + (116,1 \times 225)}{1000}$$

$$S_{\text{BEBAN}} = 93,72 \text{ kVA}$$

Kemudian bisa dihitung persentase pembebanan transformator di tanggal 24 Oktober 2024 pukul 20.00 WIT yakni:

$$\% \text{ Beban} = \frac{S_{\text{BEBAN}}}{S_{\text{TRAFO}}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Beban} = \frac{93,72}{100} \times 100\%$$

$$\% \text{ Beban} = 93,72 \%$$

Dengan memakai perumusan yang sama seperti diatas, maka persentase pembebanan transformator gardu distribusi MOADK006 yang diukur pada tanggal 24 Oktober 2024 waktu LWBP dan WBP, dilihat di tabel 4.9 dan 4.10 yakni

Tabel 4. 9 Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran LWBP

Tanggal	Waktu LWBP (WIT)	Beban Transformator (kVA)	Persentase Beban Transformator (%)
Kamis, 24 Oktober 2024	12.00	77,78	77,78
Kamis, 24 Oktober 2024	13.00	80,12	80,12
Kamis, 24 Oktober 2024	14.00	78,73	78,73

Tabel 4. 10 Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran WBP

Tanggal	Waktu WBP (WIT)	Beban Transformator (kVA)	Persentase Beban Transformator (%)
Kamis, 24 Oktober 2024	18.00	81,58	81,58
Kamis, 24 Oktober 2024	19.00	89,21	89,21
Kamis, 24 Oktober 2024	20.00	93,72	93,72

4.2.2 Perhitungan Persentase Kelebihan Beban Di Transformator Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan

Dijelaskan bahwa pembebanan transformator yang ideal disarankan diatas batas minimal $> 40\%$ dan batas maksimal dibawah $< 80\%$ dari kapasitas transformator yang terpasang atau arus nominal (I_n) transformator. Untuk mengetahui besaran arus nominal (I_n) dari transformator bisa dilihat pada data spesifikasi atau *nameplate* transformator, data *nameplate* transformator gardu distribusi MOADK006 dilihat di tabel 4.1. Berdasarkan *nameplate* transformator gardu distribusi MOADK006 kapasitas 100 kVA, transformator tersebut bisa dibebani dengan arus nominal (I_n) sebesar 144,34 A sisi sekunder atau sisi tegangan rendah. Sehingga bisa dihitung batas arus beban ideal transformator gardu distribusi MOADK006 melalui persamaan rumus 2.4 yakni:

$$I_{\text{ideal}} = 80\% \times I_n$$

$$I_{\text{ideal}} = 80\% \times 144,34$$

$$I_{\text{ideal}} = 115,47 \text{ A}$$

Berdasarkan perhitungan, transformator gardu distribusi MOADK006 kapasitas 100 kVA arus beban ideal yang bisa dibebani maksimal di masing-masing fasa secara terus menerus sebesar 115,47 A.

Berdasarkan tabel 4.3 dan 4.4 hasil pengukuran pembebanan gardu distribusi MOADK006 yang sudah diukur pada tanggal 24 Oktober 2024 pada saat waktu LWBP dan WBP, diperoleh pembebanan terbesar pada pukul 20.00 WIT di masing-masing fasa ialah sebesar 177,4 A di fasa R, sebesar 123,6 A di fasa S, sebesar 116,1 A di fasa T. Kemudian dihitung besar persentase kelebihan beban dari pembebanan terbesar tersebut dari ketentuan 80% pembebanan dari arus nominal (In) transformator memakai persamaan rumus 2.5, 2.6, dan 2.7 yakni:

$$R_{Lbh} = \frac{I_r - (80\% \times I_n)}{(80\% \times I_n)} \times 100\%$$

$$= \frac{177,4 - 115,47}{115,47} \times 100\%$$

$$= 53,63\%$$

$$S_{Lbh} = \frac{I_s - (80\% \times I_n)}{(80\% \times I_n)} \times 100\%$$

$$= \frac{123,6 - 115,47}{115,47} \times 100\%$$

$$= 7,04\%$$

$$T_{Lbh} = \frac{I_t - (80\% \times I_n)}{(80\% \times I_n)} \times 100\%$$

$$= \frac{116,1 - 115,47}{115,47} \times 100\%$$

$$= 0,55\%$$

Berdasarkan tabel 4.3 dan 4.4 hasil pengukuran pembebanan gardu distribusi MOADK006 yang sudah diukur pada tanggal 24 Oktober 2024 pada saat waktu LWBP dan WBP. Perhitungan memakai rumus diatas pembebanan terbesar di fasa R yakni sebesar 177,4 A mengalami persentase kelebihan pembebanan sebesar 53,63% dengan berpatokan 80% dari arus nominal transformator 100 kVA, pembebanan terbesar di fasa S yakni sebesar 123,6 A mengalami persentase kelebihan pembebanan sebesar 7,04% dengan berpatokan 80% dari arus nominal (In) transformator 100 kVA, dan pembebanan terbesar di fasa T yakni sebesar 116,1 A mengalami persentase kelebihan pembebanan sebesar 0,55% dengan berpatokan 80% dari arus nominal transformator 100 kVA gardu distribusi MOADK006.

4.2.3 Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan

Pertama menghitung arus rata-rata pembebanan gardu distribusi MOADK006 dengan persamaan rumus 2.9 yakni:

$$\begin{aligned} I_{\text{rata-rata}} &= \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \\ &= \frac{177,4 + 123,6 + 116,1}{3} \\ &= 139,03 \text{ A} \end{aligned}$$

Sesudah memperoleh hasil perhitungan arus induk rata-rata diatas, kemudian menghitung ketidakseimbangan beban tiap fasa di gardu distribusi MOADK006 memakai persamaan rumus 2.13, 2.14 dan 2.15 yakni:

$$I_R = a \times I_{\text{rata-rata}}, \text{ maka } a = \frac{I_R}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{177,4}{139,03} = 1,28$$

$$I_S = a \times I_{\text{rata-rata}}, \text{ maka } b = \frac{I_S}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{123,6}{139,03} = 0,89$$

$$I_T = a \times I_{\text{rata-rata}}, \text{ maka } c = \frac{I_T}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{116,1}{139,03} = 0,84$$

Dengan memakai koefisien keseimbangan beban yakni $a=b=c=1$, bisa dikatakan arus rata-rata ialah arus fasa yang dalam keadaan seimbang. Sehingga menghitung persentase rata-rata ketidakseimbangan beban memakai persamaan rumus 2.16 yakni:

$$\begin{aligned} \text{KS} &= \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100 \% \\ &= \frac{\{|1,28-1|+|0,89-1|+|0,84-1|\}}{3} \times 100 \% \\ &= 18,40\% \end{aligned}$$

Maka persentase ketidakseimbangan beban gardu distribusi MOADK006 sebelum dilaksanakan penambahan transformator sisipan yakni sebesar 18,40%. Berdasarkan tabel 2.3 *health index* transformator distribusi ketidakseimbangan arus antar fasa dibagi menjadi 4 kategori yakni ketidakseimbangan beban kurang dari <10% dikategorikan baik, 10% - <20% dikategorikan cukup, 20% - <25% dikategorikan kurang, dan diatas atau sama dengan $\geq 25\%$ dikategorikan buruk. Diperoleh besar persentase ketidakseimbangan beban gardu distribusi MOADK006

sebesar 18,40%. Sehingga bisa dikatakan persentase ketidakseimbangan beban gardu distribusi MOADK006 dalam kategori cukup.

4.2.4 Perhitungan Persentase Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Pada Ujung Jaringan di Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan

Berdasarkan tabel 4.4 data hasil pengukuran pembebanan gardu distribusi MOADK006 yang diukur pada tanggal 24 Oktober 2024 waktu WBP, jatuh tegangan (*drop viltage*) pada ujung jaringan bisa diperoleh dengan persamaan rumus 2.8 yakni:

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

Dari perumusan tersebut maka bisa dihitung jatuh tegangan (*drop viltage*) pada ujung jaringa di tanggal 24 Oktober 2024 pukul 20.00 WIT yakni:

Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Fasa R

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = \frac{225 - 205}{225} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = 8,88 \%$$

Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Fasa S

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = \frac{224 - 207}{224} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = 7,59 \%$$

Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Fasa T

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = \frac{225 - 208}{225} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = 7,55 \%$$

4.2.5 Perhitungan Persentase Pembebanan Transformator Gardu Distribusi MOADK006 dan Gardu Distribusi Sisipan Sesudah Penambahan Transformator Sisipan

Berdasarkan tabel 4.5 dan 4.6 data hasil pengukuran pembebanan gardu distribusi MOADK006 sesudah penambahan transformator sisipan serta tabel 4.7 dan 4.8 data hasil pengukuran pembebanan gardu distribusi sisipan yang diukur pada tanggal 12 November 2024 waktu LWBP dan WBP, pembebanan serta persentase pembebanan transformator MOADK006 bisa diperoleh dengan persamaan rumus 2.2 dan persamaan rumus 2.3 yakni:

$$S_{\text{BEBAN}} = \frac{(IR \times VR - N) + (IS \times VS - N) + (IT \times VT - N)}{1000}$$

$$\% \text{ Beban} = \frac{S_{\text{BEBAN}}}{S_{\text{TRAFO}}} \times 100\%$$

Dari perumusan tersebut maka bisa dihitung pembebanan transformator di tanggal 12 November 2024 pukul 20.00 WIT yakni:

$$S_{\text{BEBAN}} = \frac{(IR \times VR - N) + (IS \times VS - N) + (IT \times VT - N)}{1000}$$

$$S_{\text{BEBAN}} = \frac{(64,58 \times 222) + (88,17 \times 221) + (50,43 \times 222)}{1000}$$

$$S_{\text{BEBAN}} = 45,02 \text{ kVA}$$

Kemudian bisa dihitung persentase pembebanan transformator di tanggal 12 November 2024 pukul 20.00 WIT yakni:

$$\% \text{ Beban} = \frac{S_{\text{BEBAN}}}{S_{\text{TRAFO}}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Beban} = \frac{45,02}{100} \times 100\%$$

$$\% \text{ Beban} = 45,02 \%$$

Dengan memakai perumusan yang sama seperti diatas, maka persentase pembebanan transformator gardu distribusi MOADK006 yang diukur pada tanggal 12 November 2024 waktu LWBP dan WBP, dilihat di tabel 4.11 dan 4.12 yakni:

Tabel 4. 11 Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran LWBP

Tanggal	Waktu LWBP (WIT)	Beban Transformator (kVA)	Persentase Beban Transformator (%)
Selasa, 12 November 2024	12.00	36,54	36,54
Selasa, 12 November 2024	13.00	38,26	38,26
Selasa, 12 November 2024	14.00	37,20	37,20

Tabel 4. 12 Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran WBP

Tanggal	Waktu WBP (WIT)	Beban Transformator (kVA)	Persentase Beban Transformator (%)
Selasa, 12 November 2024	18.00	38,04	38,04
Selasa, 12 November 2024	19.00	40,03	40,03
Selasa, 12 November 2024	20.00	45,02	45,02

Dengan memakai perumusan yang sama seperti diatas, maka persentase pembebanan transformator gardu distribusi sisipan yang diukur pada tanggal 12 November 2024 waktu LWBP dan WBP, dilihat di tabel 4.13 dan 4.14 yakni:

Tabel 4. 13 Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi Sisipan Saat Pengukuran LWBP

Tanggal	Waktu LWBP (WIT)	Beban Transformator (kVA)	Persentase Beban Transformator (%)
Selasa, 12 November 2024	12.00	41,04	41,04
Selasa, 12 November 2024	13.00	42,12	42,12
Selasa, 12 November 2024	14.00	41,28	41,28

Tabel 4. 14 Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi Sisipan Saat Pengukuran WBP

Tanggal	Waktu WBP (WIT)	Beban Transformator (kVA)	Persentase Beban Transformator (%)
Selasa, 12 November 2024	18.00	42,76	42,76
Selasa, 12 November 2024	19.00	45,19	45,19
Selasa, 12 November 2024	20.00	48,81	48,81

Berdasarkan data hasil perhitungan pembebanan dan persentase pembebanan transformator di tabel 4.11 dan 4.12 bisa dilihat bahwa pembebanan tertinggi di gardu distribusi MOADK006 terjadi pada hari Selasa, 12 November 2024 pukul 20.00 WIT, dengan persentase pembebanan 45,02% dari kapasitas transformator yang terpasang. Besarnya persentase pembebanan tersebut masih sesuai dengan SPLN dimana pembebanan ideal transformator tidak melebihi diatas batas minimal > 40% dan batas maksimal dibawah < 80% dari kapasitas transformator. Sehingga

metode penambahan transformator sisipan untuk mengatasi gardu distribusi MOADK006 yang mengalami kondisi *overload* bisa teratasi.

4.2.6 Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan

Pertama menghitung arus rata-rata pembebanan gardu distribusi MOADK006 dengan persamaan rumus 2.9 yakni:

$$\begin{aligned} I_{\text{rata-rata}} &= \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \\ &= \frac{64,58 + 88,17 + 50,43}{3} \\ &= 67,73 \text{ A} \end{aligned}$$

Sesudah memperoleh hasil perhitungan arus induk rata-rata diatas, kemudian menghitung ketidakseimbangan beban tiap fasa di gardu distribusi MOADK006 memakai persamaan rumus 2.13, 2.14 dan 2.15 yakni:

$$\begin{aligned} I_R &= a \times I_{\text{rata-rata}}, \text{ maka } a = \frac{I_R}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{64,58}{67,73} = 0,95 \\ I_S &= b \times I_{\text{rata-rata}}, \text{ maka } b = \frac{I_S}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{88,17}{67,73} = 1,30 \\ I_T &= c \times I_{\text{rata-rata}}, \text{ maka } c = \frac{I_T}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{50,43}{67,73} = 0,74 \end{aligned}$$

Dengan memakai koefisien keseimbangan beban yakni $a=b=c=1$, bisa dikatakan arus rata-rata ialah arus fasa yang dalam keadaan seimbang. Sehingga menghitung persentase rata-rata ketidakseimbangan beban memakai persamaan rumus 2.16 yakni:

$$\begin{aligned} \text{KS} &= \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100 \% \\ &= \frac{\{|0,95-1|+|1,30-1|+|0,74-1|\}}{3} \times 100 \% \\ &= 20,12\% \end{aligned}$$

Maka persentase ketidakseimbangan beban gardu distribusi MOADK006 sesudah dilaksanakan penambahan transformator sisipan yakni sebesar 20,12%. Berdasarkan tabel 2.3 *health index* transformator distribusi ketidakseimbangan arus antar fasa dibagi menjadi 4 kategori yakni ketidakseimbangan beban kurang dari <10% dikategorikan baik, 10% - <20% dikategorikan cukup, 20% - <25%

dikategorikan kurang, dan diatas atau sama dengan $\geq 25\%$ dikategorikan buruk. Diperoleh besar persentase ketidakseimbangan beban gardu distribusi MOADK006 sebesar 20,12%. Sehingga bisa dikatakan persentase ketidakseimbangan beban gardu distribusi MOADK006 dalam kategori kurang.

4.2.7 Perhitungan Persentase Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Pada Ujung Jaringan di Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan

Berdasarkan tabel 4.6 data hasil pengukuran pembebanan gardu distribusi MOADK006 yang diukur pada tanggal 12 November 2024 waktu WBP, jatuh tegangan (*drop viltage*) pada ujung jaringan bisa diperoleh dengan persamaan rumus 2.8 yakni:

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

Dari perumusan tersebut maka bisa dihitung jatuh tegangan (*drop viltage*) pada ujung jaringan di gardu distribusi MOADK006 sesudah penambahan transformator sisipan tanggal 12 November 2024 pukul 20.00 WIT yakni:

Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Fasa R

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = \frac{222 - 216}{222} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = 2,70 \%$$

Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Fasa S

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = \frac{221 - 214}{221} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = 3,16 \%$$

Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Fasa T

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = \frac{222 - 217}{222} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = 2,25 \%$$

Kemudian menghitung jatuh tegangan (*drop viltage*) pada ujung jaringan di gardu distribusi baru sisip tanggal 12 November 2024 pukul 20.00 WIT yakni:

Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Fasa R

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = \frac{222 - 213}{222} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = 4,05 \%$$

Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Fasa S

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = \frac{222 - 215}{221} \times 100\%$$

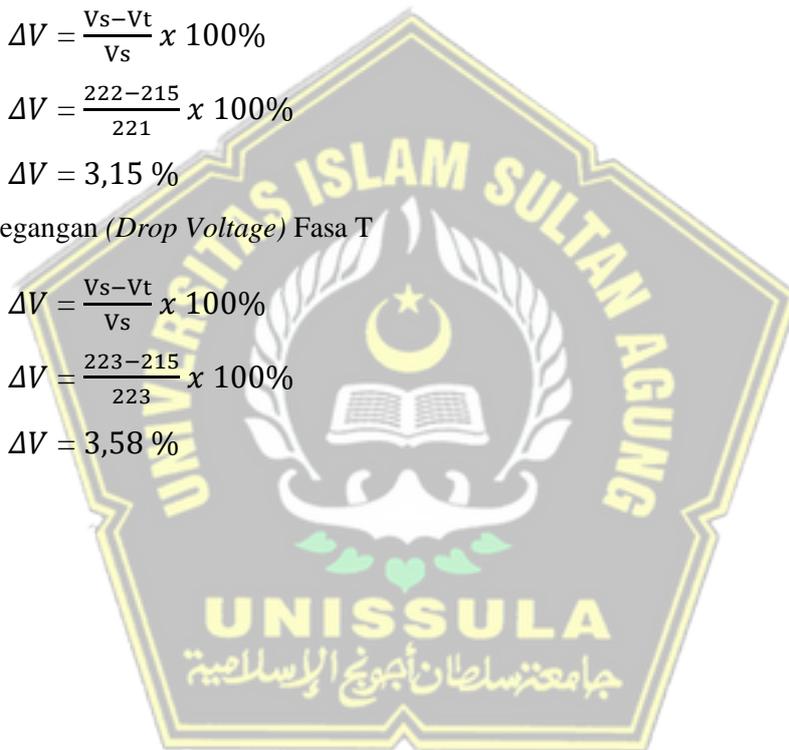
$$\% \Delta V = 3,15 \%$$

Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Fasa T

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = \frac{223 - 215}{223} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = 3,58 \%$$



4.2.8 Perhitungan Estimasi Pertumbuhan Beban Berdasarkan Konsumsi Energi Listrik

Data penjualan energi listrik wilayah ULP Moa dalam kurun waktu lima tahun terakhir bisa dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 4. 15 Data Konsumsi Energi Listrik di ULP Moa Selama 5 Tahun Terakhir

 PT PLN (PERSERO) UIW MMU UNIT PELAKSANA PELAYANAN PELANGGAN SAUMLAKI UNIT LAYANAN PELANGGAN MOA		
PENJUALAN ENERGI LISTRIK		
No.	Tahun	Penjualan Listrik (kWh)
1	2019	12.446.630
2	2020	13.067.840
3	2021	14.278.421
4	2022	15.116.392
5	2023	16.231.541

Sumber: PT.PLN (Persero) ULP Moa (2024)

Untuk menentukan persentase peningkatan penjualan energi listrik dirumuskan dengan persamaan 2.23, 2.24 dan 2.25 yakni:

Persentase konsumsi energi listrik di ULP Moa tahun 2019-2020

$$\begin{aligned}
 PB &= \frac{KEL_n - KEL_p}{KEL_p} \times 100\% \\
 &= \frac{13.067.840 - 12.446.630}{12.446.630} \times 100\% \\
 &= 4,99 \%
 \end{aligned}$$

Persentase konsumsi energi listrik di ULP Moa tahun 2020-2021

$$\begin{aligned}
 PB &= \frac{KEL_n - KEL_p}{KEL_p} \times 100\% \\
 &= \frac{14.278.421 - 13.067.840}{13.067.840} \times 100\% \\
 &= 9,26 \%
 \end{aligned}$$

Persentase konsumsi energi listrik di ULP Moa tahun 2021-2022

$$\begin{aligned} PB &= \frac{KEL_n - KEL_p}{KEL_p} \times 100\% \\ &= \frac{15.116.392 - 14.278.421}{14.278.421} \times 100\% \\ &= 5,86 \% \end{aligned}$$

Persentase konsumsi energi listrik di ULP Moa tahun 2022-2023

$$\begin{aligned} PB &= \frac{KEL_n - KEL_p}{KEL_p} \times 100\% \\ &= \frac{16.231.541 - 15.116.392}{15.116.392} \times 100\% \\ &= 7,37 \% \end{aligned}$$

Sehingga bisa dihitung presentase konsumsi energi listrik per tahun:

$$\begin{aligned} \text{Rata - rata KEL} &= \frac{(4,99 + 9,26 + 5,86 + 7,37)}{4} \\ &= 6,87\% \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan diatas rata-rata pertumbuhan penjualan energi listrik pertahun dari 5 tahun terakhir di wilayah kerja PT. PLN (persero) ULP Moa sebesar 6,87%. Perhitungan estimasi pertumbuhan pembebanan gardu distribusi MOADK006 pada tahun 2025 yakni:

$$\begin{aligned} PB(n) &= \% \text{ Beban ke } (n - 1) + \text{Rata}^2 \text{ KEL} \times S \text{ Beban ke } (n - 1) \\ PB(2025) &= 45,02\% + (6,87\% \times 45,02) \\ &= 45,02\% + 3,09\% \\ &= 48,11\% \end{aligned}$$

Perhitungan estimasi pertumbuhan pembebanan gardu distribusi Sisipan pada tahun 2025 yakni:

$$\begin{aligned} PB(n) &= \% \text{ Beban ke } (n - 1) + \text{Rata}^2 \text{ KEL} \times S \text{ Beban ke } (n - 1) \\ PB(2025) &= 48,81\% + (6,87\% \times 48,81) \end{aligned}$$

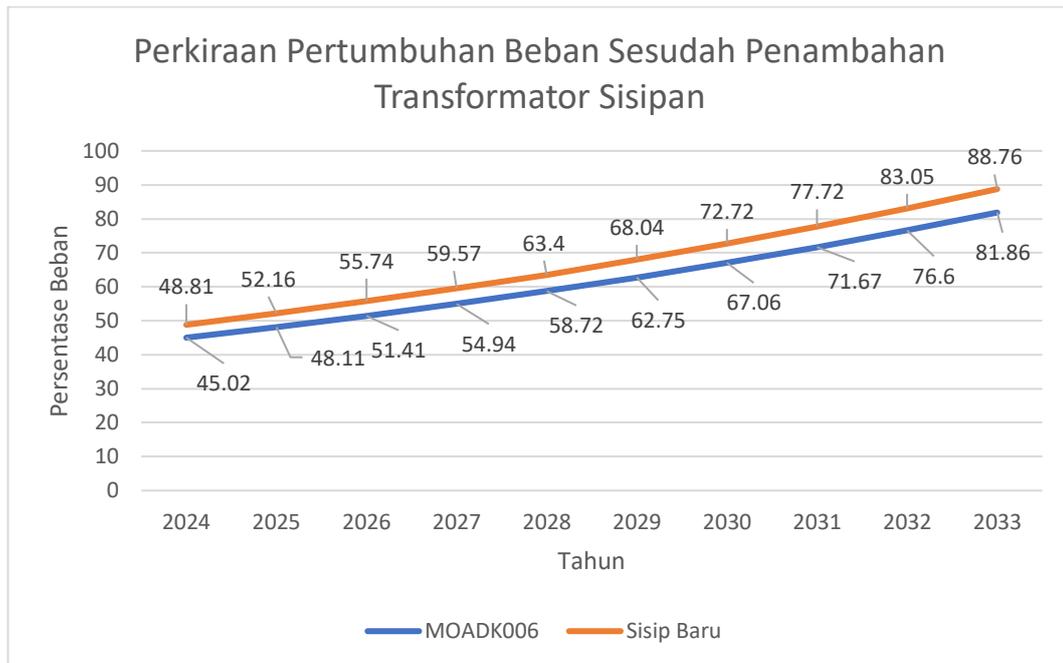
$$= 48,81\% + 3,35\%$$

$$= 52,12\%$$

Perhitungan tahun berikutnya dipakai rumus yang sama. Sehingga asumsi peningkatan persentase pembebanan pada transformator gardu distribusi MOADK006 dan Gardu Distribusi sisipan untuk 8 tahun kedepan memakai data pembebanan tertinggi saat WBP hari Selasa, 12 November 2024 pukul 20.00 WIT bisa dilihat pada tabel 4.16 berikut:

Tabel 4. 16 Estimasi Peningkatan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 dan Gardu Distribusi Sisipan

Tahun	Estimasi Pertumbuhan Pembebanan	
	MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan	Gardu Sisipan
2024	45,02%	48,81%
2025	48,11%	52,16%
2026	51,41%	55,74%
2027	54,94%	59,57%
2028	58,72%	63,4\%
2029	62,75%	68,04%
2030	67,06%	72,72%
2031	71,67%	77,72%
2032	76,60%	83,05%
2033	81,86%	88,76%



Gambar 4. 1 Grafik Perkiraan Peningkatan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 dan Gardu Distribusi Sisipan

Berdasarkan hasil perhitungan asumsi pertumbuhan pembebanan gardu distribusi MOADK006 mampu beroperasi hingga 2032 sebesar 76,6 %. Untuk gardu distribusi sisipan diperkirakan mampu beroperasi hingga tahun 2031 dengan pembebanan sebesar 77,72 %.

4.2.9 Penempatan Transformator Sisipan

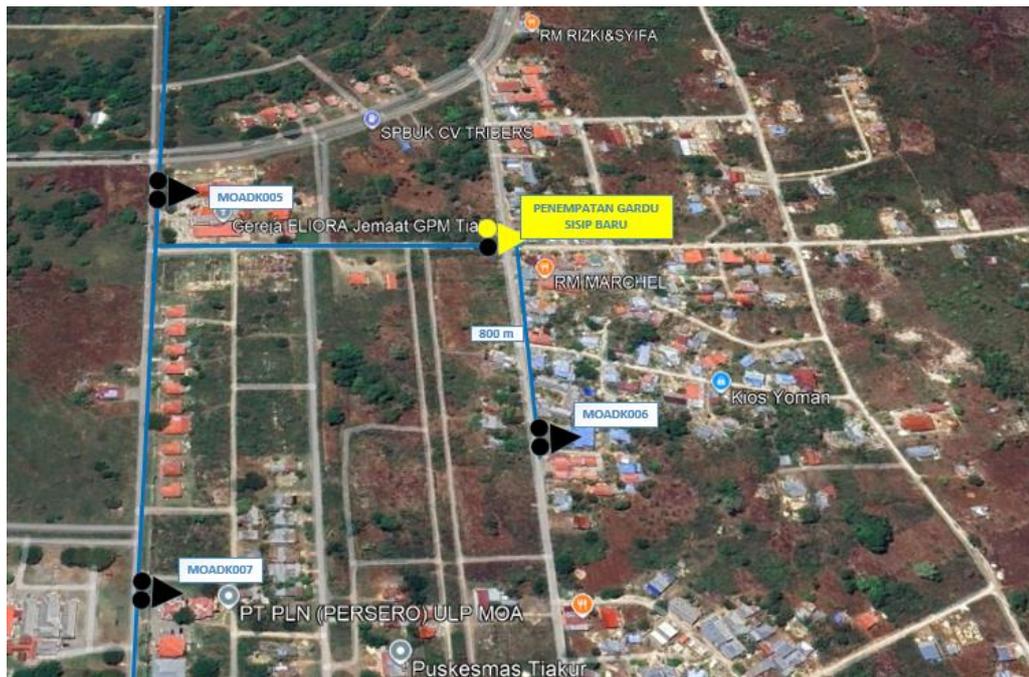
Jarak transformator yang terlalu jauh dengan beban yang akan dilayani, maka menyebabkan drop tegangan yang besar. Oleh sebab itu, pada saat pendataan kVA transformator harus diperhatikan jarak maksimum dari transformator distribusi tersebut terhadap konsumen. Perhitungan penempatan transformator bisa dihitung dengan rumus:

$$L = \frac{10\% \times VF - F}{I \text{ rata-rata} \times R \text{ saluran}}$$

$$L = \frac{10\% \times 385}{139,03 \times 0,342}$$

$$L = \frac{38,5}{47,55}$$

$$L = 0,809 \text{ km} = 809 \text{ m}$$



Gambar 4. 2 Gambar Penempatan Gardu Distribusi Sisipan

4.3 Analisis

4.3.1 Analisis Pembebanan Transformator Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan

Berdasarkan tabel 4.3 dan 4.4 pengukuran pada waktu LWBP dan WBP, data hasil perhitungan pembebanan dan persentase pembebanan gardu distribusi MOADK006 terhadap data hasil pengukuran yang dilaksanakan tanggal 24 Oktober 2024 . Diperoleh pembebanan tertinggi pada gardu distribusi MOADK006 terjadi saat LWBP pukul 13.00 WIT dengan pembebanan 80,12 kVA dan persentase pembebanan 80,12% dan saat WBP pukul 20.00 WIT dengan pembebanan 93,72 kVA dan persentase pembebanan 93,72%, dari kapasitas transformator 100 kVA. Berdasarkan Surat Edaran Direksi PT. PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014 tentang metode pemeliharaan transformator distribusi berbasis kaidah manajemen *asset* hal 8, Pembebanan transformator yang ideal disarankan dibawah <80% dari kapasitas yang terpasang. Pembebanan transformator gardu distribusi MOADK006 dikategorikan Kurang, melihat besar pembebanan transformator tersebut bisa dikatakan transformator gardu distribusi MOADK006 mengalami beban lebih atau

overload. Solusi yang dipakai untuk mengatasi masalah tersebut ialah penambahan transformator sisipan, untuk menghindari kerusakan di transformator yang bisa berakibat berkurangnya umur atau *lifetime* transformator yang berpengaruh terhadap keandalan dan kontinuitas penyaluran energi listrik

4.3.2 Analisis Besar Kelebihan Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan

Berdasarkan table 4.1 spesifikasi gardu distribusi MOADK006 dengan kapasitas transformator 100 kVA, arus nominal transformator tersebut dilihat pada nameplate transformator bisa dibebani sebesar 144,34 A di sisi skunder. Standar PLN, pembebanan ideal untuk arus maksimal transformator yakni 80% dari kapasitas atau arus nominal. Idealnya transformator 100 kVA gardu distribusi MOADK006 dibebani arus untuk tiap fasa yakni 115,47 A. Berdasarkan tabel 4.3 dan 4.4 hasil pengukuran pembebanan gardu distribusi MOADK006 yang dilaksanakan saat LWBP dan WBP, pembebanan terbesar pada masing-masing fasa ialah 177,4 A di fasa R dengan persentase kelebihan pembebanan sebesar 53,63%. 123,6 A di fasa S mengalami persentase kelebihan pembebanan sebesar 7,04%. Dan 116,1 A di fasa T mengalami persentase kelebihan pembebanan sebesar 0,55% dari 80% arus nominal transformator 100 kVA gardu distribusi MOADK006.

4.3.3 Analisis Pembebanan Transformator Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan

Berdasarkan tabel 4.5 dan 4.6 pengukuran pada waktu LWBP dan WBP, data hasil perhitungan pembebanan dan persentase pembebanan gardu distribusi MOADK006 terhadap data hasil pengukuran yang dilaksanakan tanggal 12 November 2024. Diperoleh pembebanan tertinggi pada gardu distribusi MOADK006 terjadi saat LWBP pukul 13.00 WIT dengan pembebanan 38,26 kVA dan persentase pembebanan 38,26% dan saat WBP pukul 20.00 WIT dengan pembebanan 45,02 kVA dan persentase pembebanan 45,02%, dari kapasitas transformator 100 kVA. Besar persentase pembebanan transformator gardu distribusi MOADK006 sudah sesuai dengan Surat Edaran Direksi PT. PLN

(Persero) No. 0017.E/DIR/2014 tentang metode pemeliharaan transformator distribusi berbasis kaidah manajemen asset hal 8, Pembebanan transformator yang ideal disarankan dibawah <80% dari kapasitas yang terpasang. Sehingga masalah overload di gardu distribusi MOADK006 teratasi dengan metode Penambahan transformator sisipan, dengan kategori baik.

4.3.4 Analisis Ketidakseimbangan Beban Gardu Distribusi MOADK006

Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi bisa menimbulkan arus di netral transformator, arus yang mengalir di netral transformator ini mengakibatkan terjadinya rugi-rugi yakni rugi-rugi arus netral di penghantar netral transformator dan rugi-rugi arus netral yang mengalir ke bumi.

Berdasarkan Surat Edaran Direksi PT. PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014 tentang metode pemeliharaan transformator distribusi berbasis kaidah manajemen asset hal 8, tabel 2.2 *health index* transformator distribusi ketidakseimbangan arus antar fasa.

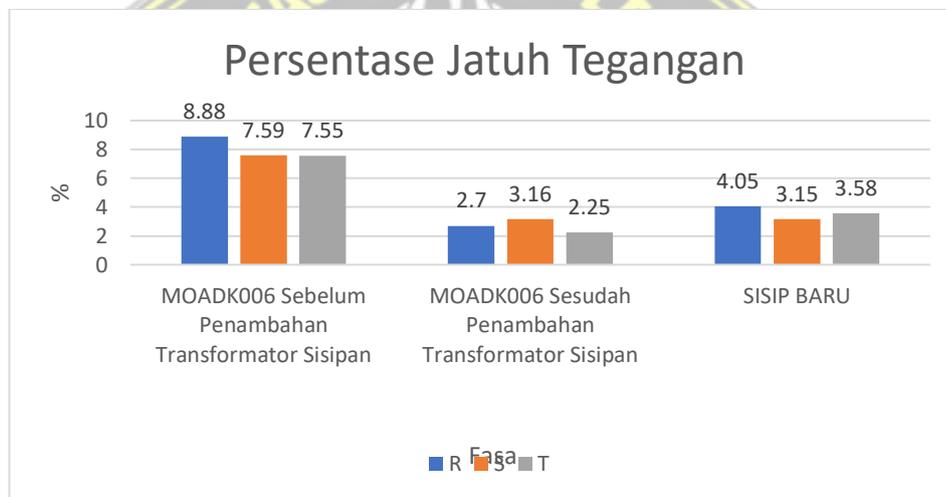
Persentase ketidakseimbangan beban gardu distribusi MOADK006 sebelum penambahan gardu sisipan yakni 18,40%, hasil berikut dalam kategori cukup (10% - < 20%). Untuk Persentase ketidakseimbangan beban gardu distribusi MOADK006 sesudah penambahan gardu sisipan yakni 20,12% hasil berikut dikategorikan kurang (20% - < 25%). Hal demikian disarankan untuk dilaksanakan manajemen beban Gardu distribusi MOADK006 dengan pemerataan beban antar fasa agar beban gardu bisa seimbang.

4.3.5 Analisis Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Pada Ujung Jaringan di Gardu Distribusi MOADK006

Berasarkan hasil perhitungan persentase jatuh tegangan (*drop voltage*) pada ujung jaringan di Gardu Distribusi MOADK006 sebelum dan sesudah penambahan transformator sisipan bisa dilihat tabel 4.17 berikut:

Tabel 4. 17 Persentase Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Pada Ujung Jaringan di Gardu Distribusi MOADK006

Fasa	Persentase Jatuh Tegangan		
	MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan	MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan	Gardu Sisip Baru
R	8,88%	2,70%	4,05%
S	7,59%	3,16%	3,15%
T	7,55%	2,25%	3,58%



Gambar 4. 3 Grafik Persentase Jatuh Tegangan Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum dan Sesudah Penambahan Transformator Sisipan dan Gardu Sisip Baru

Berasarkan hasil pengukuran tegangan ujung jaringan pada gardu distribusi MOADK006 sebelum penamabahn transformator sisipan diperoleh nilai persentase jatuh tegangan sebesar 8,88% untuk fasa R, 7,59% untuk fasa S, dan 7,55% untuk fasa T. Nilai tersebut masih memenuhi standar menurut SPLN T6.001:2013, dimana standar tegangan sistem yang diterapkan pada sistem distribusi tegangan rendah ialah -10% dan +5% dari tegangan nominal.

Untuk hasil pengukuran tegangan ujung jaringan pada gardu distribusi MOADK006 sesudah penamabahn transformator sisipan diperoleh jatuh tegangan (*drop voltage*) sudah berkurang dimana nilai persentase jatuh tegangan sebesar 2,7% untuk fasa R, 3,16% untuk fasa S, dan 2,25% untuk fasa T. Hasil tersebut sesuai standar dan penambahan transformator sisip ini akan berdampak baik pada penyaluran energi listrik dan penekanan *losses*.

4.3.6 Analisis Estimasi Pertumbuhan Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006

Berdasarkan perhitungan hasil rata-rata pertumbuhan beban pertahun berdasarkan persentase konsumsi energi listrik selama 5 tahun terakhir di wilayah kerja PT. PLN (persero) ULP Moa kenaikan rata-rata pertahun sebesar 6,87%. Hasil perhitungan prediksi perkembangan pembebanan hingga 2032 sebesar 76,60% pada saat WBP, perhitungan tersebut diambil dari peningkatan beban sebesar 6,87% tiap tahunnya. Bisa dilihat hingga 8 tahun mendatang tahun 2032, gardu distribusi MOADK006 mampu menopang beban dengan persentase dibawah <80% dari kapasitas yang terpasang.

4.3.7 Analisis Faktor Yang Mempengaruhi Terjadinya Beban Lebih Pada Transformator Distribusi

Transformator distribusi bisa mengalami beban berlebih yang diakibatkan oleh faktor usia atau jangka lama transformator dioperasikan, seiring dengan bertambahnya jumlah pelanggan serta beban yang mengalir pada tranformator tersebut, Adapun faktor-faktor penyebab terjadinya beban lebih pada transformator:

1. Arus beban listrik melebihi arus nominal transformator, Disebabkan oleh penambahan beban yang disuplai oleh transformator pada sisi sekunder yang sering terjadi akibat kurangnya antisipasi penambahan pelanggan yang begitu signifikan dan juga adanya gangguan arus singkat dalam sistem.
2. Peningkatan suhu transformator, transformator yang beroperasi secara terus menerus dalam keadaan *overload*, bisa menyebabkan peningkatan suhu pada inti besi dan kumparan. Kenaikan suhu yang terlalu tinggi mengakibatkan kerusakan

pada isolasi kumparan. Disamping itu juga suhu lingkungan yang terlalu tinggi juga menyebabkan kenaikan suhu pada transformator.

3. Ketidakseimbangan beban antar fasa terlalu besar (>25%) atau pembagian beban yang tidak merata, menyebabkan *overload* pada satu atau beberapa fasa transformator.
4. Kurangnya pemeliharaan pada transformator, kegagalan seperti pada sistem pendinginnya, baik kebocoran minyak trafo maupun rusaknya sirip trafo akibat kurangnya pengecekan dan pemeliharaan trafo secara rutin.

Tranformator distribusi yang mengalami beban lebih tersebut perlu diatasi segera mungkin, adapun langkah-langkah yang bisa dilaksanakan yakni:

1. Mengurangi beban transformator, Dengan memantau beban transformator secara rutin bisa segera mungkin untuk dikurangi bebannya dengan penyeimbangan beban ataupun pemindahan beban ke trafo terdekat.
2. Ketidakseimbangan beban diperbaiki, mendistribusikan beban secara merata pada masing-masing fasa, bisa menurunkan beban berlebih pada salah satu fasa yang terjadi perbedaan beban yang signifikan antar fasa lainnya.
3. Menambah kapasitas transformator, memperhitungkan penambahan beban dengan melihat tren peningkatan beban di daerah yang dibebani oleh transformator, sehingga bisa memilih kapasitas transformator yang lebih besar dan sesuai dengan kebutuhan di masa mendatang, yang perlu diperhatikan dalam metode ini yakni kondisi atau konstruksi tiang gardu distribusinya dan panjang jaringan sampai ujung konsumen karena berdampak pada nilai jatuh tegangan (*drop voltage*).
4. Penamabahan transformator sisipan, sisip transformator dimaksudkan ialah membangun gardu baru di dekat gardu yang mengalami *overload*, sehingga beban bisa dialihkan ke gardu baru yang sudah dibangun, metode ini umum dilaksanakan untuk mengatasi gardu *overload*. Yang perlu diperhatikan dalam melaksanakan metode ini yakni biaya pengadaan bangun gardu, biaya pengadaan transformator, biaya jasa pekerjaan serta yang penting yakni perijinan dari pihak setempat terkait penggunaan lahan tersebut untuk dibangun gardu baru atau sisip transformator.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dan analisis yang sudah dipaparkan, maka bisa ditarik suatu kesimpulan yakni:

1. Berdasarkan analisis pembebanan transformator gardu distribusi MOADK006 kapasitas 100 kVA. Diperoleh pembebanan tertinggi saat WBP pukul 20.00 WIT dengan pembebanan 93,72 kVA dan persentase pembebanan 93,72%. Berdasarkan Surat Edaran Direksi PT. PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014, masuk ke dalam kondisi kurang (80% - <100%) dan mengalami beban lebih atau *overload*. Sesudah dilaksanakan penambahan transformator sisipan, diperoleh pembebanan tertinggi saat WBP pukul 20.00 WIT dengan pembebanan 45,02 kVA dan persentase pembebanan 45,02%. Kondisi beban lebih pada gardu distribusi sudah teratasi dalam standar baik (dibawah <60%), sesuai dengan Surat Edaran Direksi PT. PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014.
2. Kelebihan beban transformator gardu distribusi MOADK006 kapasitas 100 kVA, sebelum dilaksanakan penambahan transformator sisipan diperoleh pembebanan tertinggi pada saat WBP hari Kamis, tanggal 24 Oktober 2024, pembebanan terbesar di fasa R sebesar 177,4 A dengan persentase kelebihan pembebanan sebesar 53,63%, di fasa S sebesar 123,6 A dengan persentase kelebihan pembebanan sebesar 7,04%, dan di fasa T sebesar 116,1 A dengan persentase kelebihan pembebanan sebesar 0,55% berpatokan 80% dari arus nominal transformator 100 kVA.
3. Ketidakseimbangan pembebanan gardu distribusi MOADK006 sebelum penambahan transformator sisipan yakni 18,40% yang dikategorikan cukup. Untuk Persentase ketidakseimbangan beban gardu distribusi MOADK006 sesudah penambahan gardu sisipan yakni 20,12% hasil berikut dikategorikan kurang 20% - < 25%). Hal demikian disarankan untuk dilaksanakan manajemen beban Gardu distribusi MOADK006 dengan pemerataan beban antar fasa agar beban gardu bisa seimbang.

4. Faktor yang mempengaruhi transformator dalam kondisi *overload* ialah arus beban listrik atau pembebanan sudah melebihi kapasitas dari transformator, peningkatan suhu transformator, ketidakseimbangan beban antar fasa terlalu besar ($>25\%$), dan kurangnya pemeliharaan pada transformator. Langkah-langkah untuk mengatasi *overload* pada transformator distribusi yakni mengurangi beban transformator, menambah kapasitas transformator dengan kapasitas yang lebih besar, dan penambahan transformator sisipan. Metode penambahan transformator sisipan dipakai untuk mengatasi kondisi beban lebih (*overload*) pada gardu distribusi MOADK006 dengan melihat pertumbuhan perkembangan beban.
5. Dengan Penambahan transformator sisipan diharapkan mampu menjaga keandalan dan kontinuitas penyaluran energi listrik pada PT. PLN (Persero) ULP Moa dan Gardu distribusi MOADK006 diperkirakan bisa menopang pertumbuhan beban hingga tahun 2032.

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan dari pembahasan dan analisis, adapun saran-saran yang diuraikan yakni:

1. Disarankan untuk melaksanakan penyeimbangan beban gardu distribusi MOADK006 dan Gardu Distribusi Baru Sisip pada masing-masing fasa sesudah penambahan transformator sisipan, agar ketidakseimbangan beban antar fasa sesuai standar.
2. Perlu dilaksanakan pemeliharaan dan perawatan rutin pada Transformator distribusii untuk menghindari kerusakan di transformator yang bisa berakibat berkurangnya umur atau *lifetime* transformator yang berpengaruh terhadap keandalan dan kontinuitas penyaluran energi listrik.
3. Untuk penelitian selanjutnya disarankan perlu penambahan parameter-parameter yang dapat mempengaruhi penurunan tegangan (*drop voltage*) diantaranya jarak, luas penampang kabel, kondisi minyak trafo, dan tegangan tembus trafo distribusi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian ESDM RI, “Listrik Kebutuhan Pokok yang harus Dijaga Volume, Kualitas dan Kesenambungannya,” *Arsip Ber. Menteri. ESDM RI*, 2016, [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/listrik-kebutuhan-pokok-yang-harus-dijaga-volume-kualitas-dan-kesinambungannya>
- [2] O. Renaldi, *ANALISIS KEANDALAN SALURAN UDARA TEGANGAN MENENGAH (SUTM) 20 kV BERDASARKAN SAIDI DAN SAIFI PADA PT. PLN (PERSERO) RAYON DURI RIAU*, vol. 2, no. 1. 2022.
- [3] Irawati Bursa, “Analisis Rugi-Rugi Daya akibat Ketidakseimbangan Beban pada Jaringan Distribusi Sekunder di PT. PLN (Persero) ULP Watang Sawitto,” p. 58, 2021.
- [4] Regina C.Wageydan dan dkk, “Analisis Terjadi Overload Transformator Pada Saluran Distribusi Di PT . PLN (Persero) ULP Bitung,” *Skripsi*, pp. 1–7, 2021.
- [5] S. Meliala, “DISTRIBUSI DENGAN MENGGUNAKAN TRAFU SISIP DI PT PLN (Persero) ULP LANGSA KOTA,” vol. 11, pp. 26–29, 2022.
- [6] S. Samsurizal and B. Hadinoto, “Studi Analisis Dampak Overload Transformator Terhadap Kualitas Daya Di PT. PLN(Persero) Up3 Pondok Gede,” *Kilat*, vol. 9, no. 1, pp. 136–142, 2020, doi: 10.33322/kilat.v9i1.784.
- [7] W. Armando, I. M. Wartana, and I. B. S, “PERENCANAAN PEMASANGAN GARDU SISIPAN PADA GARDU DISTRIBUSI MNK 008 PENYULANG KASUARI DI PT.PLN (PERSERO) ULP MANOKWARI KOTA,” vol. 07, pp. 288–293, 2023.
- [8] W. Setiawan Anjas and M. Ilham, “Analisis Pembebanan Trafo Sebelum Penambahan Gardu Sisipan Terhadap Besarnya Kapasitas Daya untuk Memperbaiki Pembebanan pada Gardu Distribusi,” *Vertex Elektro*, vol. 14, no. 2, pp. 90–101, 2022.
- [9] Suhadi, *Teknik distribusi tenaga listrik untuk sekolah menengah kejuruan jilid 1*. 2008. [Online]. Available:

[https://mirror.unpad.ac.id/bse/Kurikulum_2006/10_SMK/Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1.pdf](https://mirror.unpad.ac.id/bse/Kurikulum_2006/10_SMK/Teknik_Distribusi_Tenaga_Listrik_Jilid_1.pdf)

- [10] PT. PLN (Persero), “Buku 4 Standar konstruksi gardu distribusi dan gardu hubung tenaga listrik,” *PT PLN*, pp. 1–143, 2010.
- [11] PT. PLN (Persero), “Buku 1 Kriteria Enjinereng Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik,” *PT PLN*, p. 170, 2010.
- [12] D. Kho, “Pengertian Transformator (Trafo) dan Prinsip Kerjanya,” 2019.
- [13] M. Randi Wahyu Susanto, “Studi Analisis Dampak Overload Transformator Terhadap Kualitas Daya Di PT. PLN (Persero) ULP Pangkep,” *Univ. Muhammadiyah Makassar*, vol. 2, no. 1, pp. 1–12, 2020.
- [14] PT PLN (Persero), “Standar Kontruksi Sambungan Tenaga Listrik,” *Angew. Chemie Int. Ed.* 6(11), 951–952., no. Mi, pp. 5–24, 2010.
- [15] Y. A. M. Ambabunga, H. Masiku, and E. A. M. Sampetoding, “Karakteristik Transformator 3 Fasa (Hubung Bintang Dan Delta) Pada Sistem Tenaga Listrik Ac,” *J. Dyn. Saint*, vol. 6, no. 1, pp. 12–18, 2021, doi: 10.47178/dynamicsaint.v6i1.1195.
- [16] M. Ardilla, “Analisis Pengaruh Pemindahan Beban Jaringan Tegangan Rendah Terhadap Pembebanan Transformator Gardu Distribusi DB 0279 Penyulang Padang Sambilan,” 2019.
- [17] G. I. made Seniari Ni made, fadil M. najmul, “ANALISIS RENCANA PEMASANGAN TRANSFORMATOR SISIPAN PADA SALURAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI PENYULANG PAGUTAN,” *Dielektrika*, vol. 7, no. 1, pp. 56–63, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.29303/dielektrika.v7i1.226>
- [18] PT PLN (Persero), “Tegangan Standar,” *Tegangan Standar*, no. 391, p. 5, 2003.
- [19] PT PLN (Persero), *Metode Pemeliharaan Trafo Distribusi Berbasis Kaidah Manajemen Aset*. 2014.
- [20] Y. Zulfadli Pelawi, “Analisis Rugi-Rugi Daya Pada Penghantar Netral Jaringan Distribusi Sekunder Akibat Ketidakseimbangan Beban,” *Cetak) Bul. Utama Tek.*, vol. 13, no. 2, pp. 1410–4520, 2018.

- [21] P. Angely, *Hukum Kirchoff*, vol. 2. 2019.
- [22] A. A. M. Windi, “ANALISIS PENANGANAN BEBAN LEBIH DI GARDU DISTRIBUSI MOALK03 AREA KERJA PT PLN (PERSERO) UNIT LAYANAN PELANGGAN MOA,” 2024.
- [23] Hardani, *Metode Penelitian Kualitatif & Kuantitatif*. Yogyakarta, 2020.

