

**ANALISIS DAMPAK RENCANA PEMASANGAN TRANSFOMATOR
SISIPAN UNTUK MENGATASI BEBAN LEBIH DAN DROP TEGANGAN
WMN 121 DAN WMN 069 PADA PENYULANG KAONAK PT. PLN
(PERSERO) ULP WAMENA KOTA**

LAPORAN TUGAS AKHIR

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar S1

Pada Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Sultan Agung Semarang



Disusun oleh :

ONNY PAKU SADEWA

NIM : 30602300070

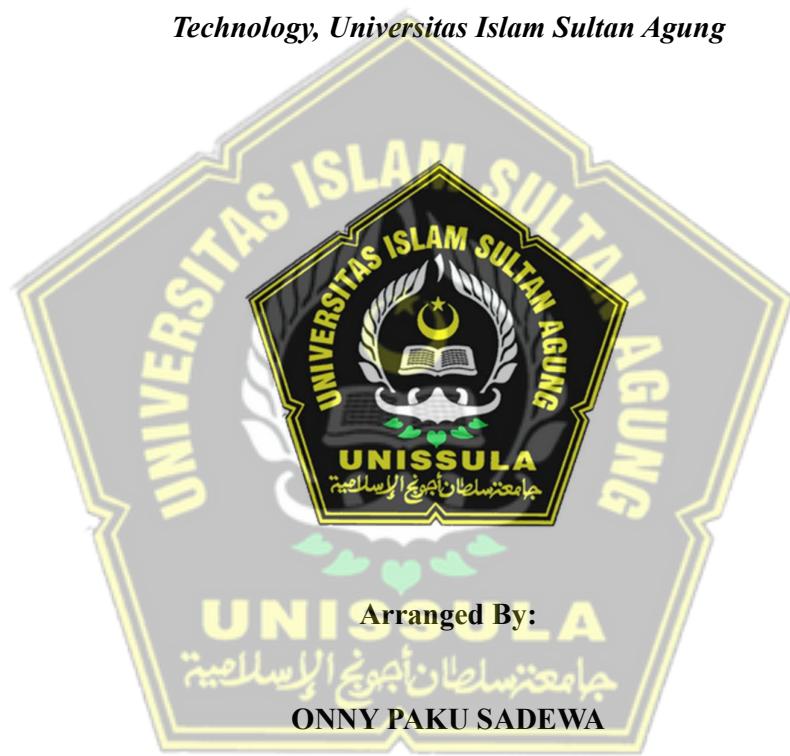
**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2025

FINAL PROJECT

***IMPACT ANALYSIS OF THE PLAN TO INSTALL AN INSERT
TRANSFORMER TO OVERCOME OVERLOAD AND VOLTAGE DROPS
IN WMN 121 AND WMN 069 ON THE KAONAK FEEDERS OF PT. PLN
(PERSERO) ULP WAMENA KOTA***

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



**MAJORING OF ELECTRICAL ENGINEERING
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY
SULTAN AGUNG ISLAMIC UNIVERSITY
SEMARANG
2025**

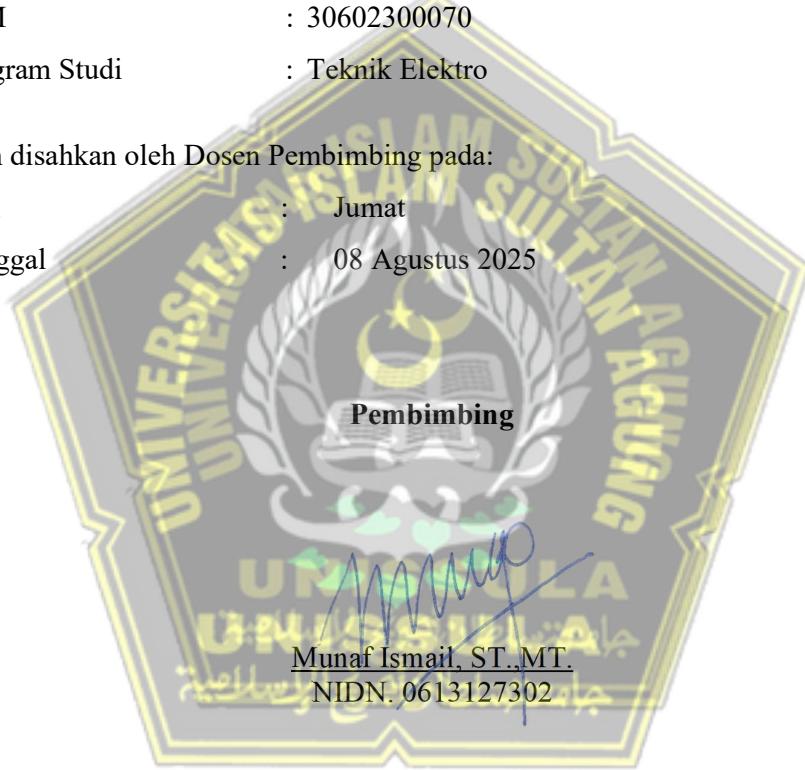
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**ANALISIS DAMPAK RENCANA PEMASANGAN TRANSFOMATOR SISIPAN UNTUK MENGATASI BEBAN LEBIH DAN DROP TEGANGAN WMN 121 DAN WMN 069 PADA PENYULANG KAONAK PT. PLN (PERSERO) ULP WAMENA KOTA**” ini disusun oleh:

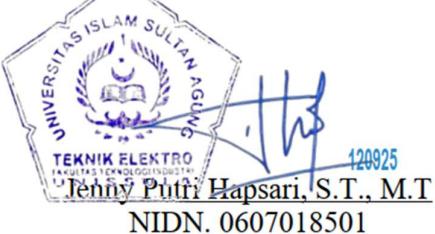
Nama : Onny Paku Sadewa
NIM : 30602300070
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan oleh Dosen Pembimbing pada:

Hari : Jumat
Tanggal : 08 Agustus 2025



Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Elektro



LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**ANALISIS DAMPAK RENCANA PEMASANGAN TRANSFOMATOR SISIPAN UNTUK MENGATASI BEBAN LEBIH DAN DROP TEGANGAN WMN 121 DAN WMN 069 PADA PENYULANG KAONAK PT. PLN (PERSERO) ULP WAMENA KOTA**” ini telah dipertahankan di depan Dosen Penguji Tugas Akhir pada:

Hari : Senin

Tanggal : 25 Agustus 2025

Ketua Penguji I

Tanda Tangan

Dr. Eka Nuryanto Budisusila, S.T., M.T.

NIDN : 0619107301



Penguji II

Dedi Nugroho, S.T., M.T.

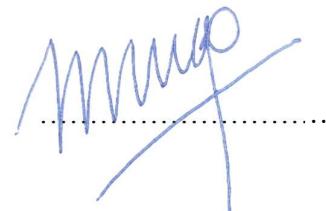
NIDN : 210603032



Penguji III

Munaf Ismail, ST.,MT.

NIDN. 0613127302

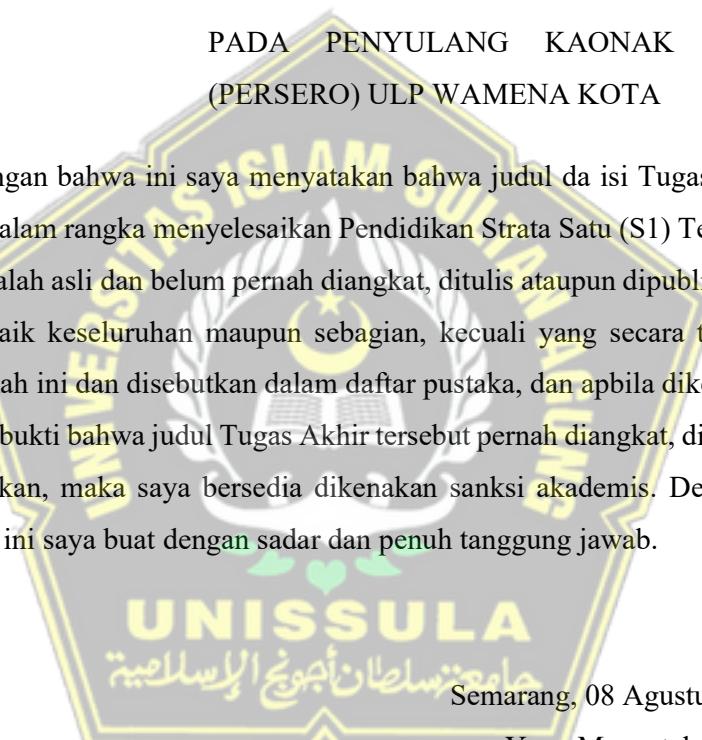


SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Onny Paku Sadewa
NIM : 30602300070
Judul Tugas Akhir : ANALISIS DAMPAK RENCANA
PEMASANGAN TRANSFOMATOR SISIPAN
UNTUK MENGATASI BEBAN LEBIH DAN
DROP TEGANGAN WMN 121 DAN WMN 069
PADA PENYULANG KAONAK PT. PLN
(PERSERO) ULP WAMENA KOTA

Dengan bahwa ini saya menyatakan bahwa judul dan isi Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) Teknik Elektro tersebut adalah asli dan belum pernah diangkat, ditulis ataupun dipublikasikan oleh siapapun baik keseluruhan maupun sebagian, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka, dan apabila dikemudian hari ternyata terbukti bahwa judul Tugas Akhir tersebut pernah diangkat, ditulis ataupun dipublikasikan, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademis. Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.



Semarang, 08 Agustus 2025

Yang Menyatakan,



Onny Paku Sadewa

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Onny Paku Sadewa
NIM : 30602300070
Program Studi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini menyatakan Karya Ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul:

**ANALISIS DAMPAK RENCANA PEMASANGAN TRANSFOMATOR
SISIPAN UNTUK MENGATASI BEBAN LEBIH DAN DROP TEGANGAN
WMN 121 DAN WMN 069 PADA PENYULANG KAONAK PT. PLN
(PERSERO) ULP WAMENA KOTA**

Menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan Hak bebas Royalti Non-Eksklusif untuk disimpan, dialihmediakan, dikelola dan pangkalan data dan dipublikasikan diinternet dan media lain untuk kepentingan akademis selama tetap menyantumkan nama penulis sebagai pemilik hak cipta. Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/Plagiatisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan Universitas Islam Sultan agung.

Semarang, 08 Agustus 2025

Yang Menyatakan,

Onny Paku Sadewa

HALAMAN PERSEMBAHAN

Puja dan puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, nikmat iman, kesehatan jasmani dan rohani, serta akal pikiran yang diberikan. Berkat karunia-Nya, penulis dapat melalui setiap proses pembelajaran, penelitian, dan penulisan Tugas Akhir ini hingga tuntas. Shalawat beserta salam semoga senantiasa tercurah kepada junjungan Nabi Muhammad SAW, suri teladan terbaik umat manusia, yang dengan perjuangan dan pengorbanan beliau kita dapat merasakan nikmat iman dan Islam hingga hari ini. Semoga kita semua memperoleh keberkahan hidup dan kelak dianugerahi syafa'at beliau di Yaumul Akhir.

Dengan penuh rasa syukur, kerendahan hati, dan penghormatan yang tulus, penulis mempersembahkan karya ini kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, yang dengan kasih sayang, doa, semangat, dan pengorbanan tanpa batas telah menjadi sumber kekuatan terbesar dalam setiap langkah penulis. Terima kasih atas setiap nasihat, bimbingan, dan kesabaran yang senantiasa mengiringi perjalanan hidup ini.
2. Bapak/Ibu Dosen Pembimbing, yang telah dengan penuh kesabaran, ketelitian, dan ketulusan hati memberikan arahan, masukan, serta bimbingan selama proses penelitian dan penyusunan Tugas Akhir ini. Segala bantuan dan perhatian yang diberikan menjadi bekal berharga bagi penulis dalam menyelesaikan karya ini.
3. Sahabat-sahabat terbaik dan orang terkasih, yang selalu setia mendengarkan keluh kesah, memberi semangat di saat penulis mulai goyah, serta mengingatkan untuk terus maju dan percaya pada diri sendiri. Terima kasih atas tawa, doa, dan dukungan yang menguatkan setiap langkah hingga sampai pada titik ini.

Karya ini bukan sekadar bentuk pemenuhan tugas akademik, melainkan juga wujud nyata dari rasa hormat, cinta, terima kasih, dan penghargaan yang tulus kepada semua pihak yang telah memberikan arti, warna, dan dukungan dalam perjalanan panjang hingga tercapainya tujuan ini.

HALAMAN MOTTO

“Apapun yang terjadi tetaplah rendah hati, jangan tertipu pujian, ingat nyamuk mati karena tepuk tangan”



KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Segala puji bagi Allah SWT atas hidayah, berkah, serta rahmat -Nya sehingga kami mampu menuntaskan Laporan Akhir dengan judul "**ANALISIS DAMPAK RENCANA PEMASANGAN TRANSFOMATOR SISIPAN UNTUK MENGATASI BEBAN LEBIH DAN DROP TEGANGAN WMN 121 DAN WMN 069 PADA PENYULANG KAONAK PT. PLN (PERSERO) ULP WAMENA KOTA**" sebagai persyaratan untuk mendapatkan gelar Strata I Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung.

Pada penyusunan Laporan Akhir ini, kami mendapatkan bantuan berupa bimbingan, pengarahan, dan motivasi dari banyak pihak baik secara moral maupun spiritual. Dengan demikian, kami mengungkapkan terimakasih terhadap:

1. Kedua Orang tua beserta semua keluarga yang sudah memberi doa serta dukungan sepanjang proses pembuatan Laporan Akhir.
2. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan semuanya, yang sudah berkontribusi dengan memberi dukungan.

Penulis sadar bahwasanya laporan akhir ini masih memiliki kekurangan yang tak terhindarkan, disebabkan oleh keterbatasan pengalaman dan wawasan penulis. Oleh karenanya, penulis berharap akan saran ataupun kritik yang konstruktif dari para pembaca. Penulis juga memohon maaf bilamana didapati perkataan atau isi tulisan yang kurang berkenan di hati para pembaca. Semoga laporan ini bisa menghadirkan manfaat, termasuk untuk penulis khususnya maupun bagi para pembaca pada umumnya.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb

Semarang, 08 Agustus 2025



Onny Paku Sadewa

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	iv
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
HALAMAN PERSEMPERBAHAN.....	vii
HALAMAN MOTTO	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
ABSTRAK.....	xiv
<i>ABSTRACT</i>	xv
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1. 1. Latar Belakang	1
1. 2. Rumusan Masalah.....	3
1. 3. Batasan Masalah	3
1. 4. Tujuan Penulisan	3
1. 5. Manfaat.....	4
1. 6. Sistematika Penulisan.....	4
BAB II	7
TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2. 1. Kajian Pustaka	7
2. 2. Landasan Teori	8
2. 2. 1. Jaringan Sistem Distribusi Primer.....	8
2. 2. 2. Jaringan Sistem Distribusi Sekunder	12
2. 2. 3. Gardu Distribusi	12
2. 2. 4. Transformator.....	17
2. 2. 5. Letak Transformator Sisipan.....	26
2. 2. 6. Kualitas Daya Listrik.....	27
2. 2. 7. Metode Peramalan Beban	28
2. 2. 8. Gangguan dan Kerusakan Pada Transformator.....	32
2. 2. 9. Program Pemeliharaan.....	33
2. 2. 10. Standar Kriteria Sehat (<i>Health Index</i>) Trafo Distribusi.....	35
2. 2. 11. Gambaran Umum Kondisi Penyalang Kaonak.....	37
2. 2. 12. ETAP.....	38

BAB III	40
METODE PENELITIAN	40
3. 1. Objek Penelitian	40
3. 2. Model Penelitian	40
3. 2. 1 Model Kondisi <i>Eksisting</i> JTR WMN 121 & WMN 069	40
3. 2. 2 Model Peramalan Beban.....	41
3. 2. 3 Model Penentuan Perkiraan Lokasi Penempatan Transformator Sisip	41
3. 2. 4 Model Perhitungan <i>Drop Tegangan</i>	43
3. 2. 5 Model Perhitungan Pembebanan Transformator	43
3. 2. 6 Model Simulasi ETAP 12.6.....	43
3. 2. 7 Perencanaan Penentuan Aksesoris Gardu Distribusi	43
3. 3. Data Penelitian	44
3. 4. Alat Penelitian	44
3. 5. Langkah Penulisan Tugas Akhir	45
BAB IV	48
4.1 Kondisi Sebelum Pemasangan Transformator Sisipan	48
4.1.1 Gardu Distribusi Pasang Luar WMN 121	50
4.1.2 Gardu Distribusi Pasang Luar WMN 069	54
4.2 Perencanaan Pemasangan Transformator Sisipan WMN 121 dan WMN 069 ..	58
4.2.1 Transformator WMN 121	58
4.2.2 Transformator WMN 069	69
4.3 Penentuan Aksesoris Gardu Sisipan Pasang Luar.....	79
4.3.1 Gardu Distribusi Sisipan Untuk WMN 121 & WMN 069	80
4.4 Analisis Setelah Pemasangan Transformator Sisip	87
4.4.1 Kondisi Pembebanan Setelah Sisip Transformator.....	87
4.4.2 Kondisi Tegangan Ujung Setelah Sisip Transformator	89
4.5 Perbandingan Analisa perhitungan dengan ETAP	91
BAB V	93
5.1 Kesimpulan.....	93
5.2 Saran	96

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem Jaringan Distribusi Radial	9
Gambar 2. 2 Sistem Jaringan Distribusi Loop	10
Gambar 2. 3 Sistem Jaringan Distribusi Spindel.....	11
Gambar 2. 4 Sistem Cluster	11
Gambar 2. 5 Komponen Sistem distribusi sekunder	12
Gambar 2. 6 Gardu Portal	13
Gambar 2. 7 Bagan satu garis konfigurasi π section Gardu Portal	14
Gambar 2. 8 Gardu Beton	15
Gambar 2. 9 Gardu Kios	16
Gambar 2. 10 Bagan satu garis Gardu Pelanggan Khusus	16
Gambar 2. 11 Inti Besi Transformator	18
Gambar 2. 12 Belitan trafo	18
Gambar 2. 13 Bushing	18
Gambar 2. 14 Transformator Dalam Keadaan Tanpa Beban	21
Gambar 2. 15 Transformator Dalam Keadaan Berbeban	22
Gambar 2. 16 Hambatan Jenis (ρ) Setiap Material.....	27
Gambar 2. 17 Grafik Peramalan Beban dengan Metode <i>Least Square</i>	28
Gambar 2. 18 Grafik Peramalan Beban dengan Metode Eksponensial	29
Gambar 2. 19 Grafik Peramalan Beban dengan Metode <i>Curve Fit</i>	29
Gambar 2. 20 Grafik Peramalan Beban dengan Metode Koefisien Beban.....	30
Gambar 2. 21 Grafik Peramalan Beban dengan Metode Pendekatan Linier.....	31
Gambar 2. 22 SLD Penyalang Kaonak.....	37
Gambar 2. 23 Jarak PLTD Sinakma dengan WMN 121	38
Gambar 2. 24 Jarak PLTD Sinakma dengan WMN 069	38
Gambar 3. 1 Persebaran Pelanggan WMN 121	40
Gambar 3. 2. Persebaran Pelanggan WMN 069	41
Gambar 3. 3 Rencana Skema Penambahan Trafo Sisip WMN 121	42
Gambar 3. 4 Rencana Skema Penambahan Trafo Sisip WMN 069 Error! Bookmark not defined.	
Gambar 3. 5 Langkah Penulisan tugas akhir.....	45
Gambar 4. 1 Nameplate Trafo WMN 121.....	50
Gambar 4. 2 SLD JTR dan Pelanggan WMN 121.....	54
Gambar 4. 3 Nameplate Transformator WMN 069	55
Gambar 4. 4 Hasil Simulasi Kondisi Awal Pembebanan Transformator WMN 121	59
Gambar 4. 5 Pembagian Jalur Pelanggan WMN 121.....	64
Gambar 4. 6 Simulasi ETAP Kondisi awal WMN 121	65
Gambar 4. 7 Rencana Lokasi Gardu Sisip WMN 121	69
Gambar 4. 8 Hasil Simulasi Kondisi Awal Pembebanan Transformator WMN 069	70
Gambar 4. 9 Pembagian Jalur Pelanggan WMN 069.....	74
Gambar 4. 10 Simulasi ETAP kondisi awal WMN 069.....	75
Gambar 4. 11 Rencana Transformator Sisip	79
Gambar 4. 12 Rencana Lokasi Gardu Sisip WMN 069	79
Gambar 4. 13 Katalog Kabel NYY	82
Gambar 4. 14 Daftar Pembebanan Penghantar Kontinu Untuk Tembaga Penampang Persegi.....	84
Gambar 4. 15 Katalog Kabelindo NFA2X-T	86

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Macam – Macam Pendingin Trafo	20
Tabel 2. 2 <i>Health index</i> trafo.....	36
Tabel 4. 1 Jumlah Trafo Per Penyulang ULP Wamena Kota.....	48
Tabel 4. 2 Daftar Gardu <i>overload</i> Penyulang Kaonak	49
Tabel 4. 3 Hasil Pengukuran WMN 121	51
Tabel 4. 4 Hasil Pengukuran Tegangan WMN 121.....	53
Tabel 4. 5 Hasil Pengukuran WBP WMN 069	56
Tabel 4. 6 Tabel Jatuh Tegangan WMN 069.....	57
Tabel 4. 7 Pembebanan WMN 121 dalam 3 Tahun Terakhir	61
Tabel 4. 8 Parameter Metode <i>Least Square</i>	61
Tabel 4. 9 Pemilihan Kapasitas Transformator	63
Tabel 4. 10 Hasil Simulasi ETAP 12.6.....	66
Tabel 4. 11 Pembebanan WMN 069 pada 3 Tahun Terakhir	71
Tabel 4. 12 Parameter Metode <i>Least Square</i>	72
Tabel 4. 13 Pemilihan Kapasitas Transformator	73
Tabel 4. 14 Hasil Simulasi ETAP 12.6.....	76
Tabel 4. 15 Komponen untuk Gardu Cantol	87
Tabel 4. 16 Simulasi Pembagian Jalur Pelanggan dengan Etap 12.6	88
Tabel 4. 17 Hasil Jatuh Tegangan Transformator WMN 121 dan WMN 069 Sesudah Pemasangan Transformator Sisip.....	90



ABSTRAK

Pada ULP Wamena Kota, terdapat Penyalang Kaonak dengan dua trafo yang kelebihan beban. Trafo WMN 121 dan WMN 069, masing-masing berkapasitas 100 kVA, menanggung beban 85% dan 95%. Sesuai SE DIR PT PLN (Persero) No.0017/2014, kondisi ini tidak ideal. Selain itu, terjadi penurunan tegangan di pelanggan terjauh yaitu penurunan tegangan sebesar 16,6% untuk trafo WMN 121 dan 13,7% untuk WMN 069, melebihi batas toleransi SPLN No. 1 Tahun 1995 (+5% hingga -10%). Solusi yang dianggap paling efektif adalah dengan melakukan pemasangan trafo sisipan. Dalam merencanakan pemasangan ini, perlu dilakukan peramalan beban, penentuan kapasitas trafo sisip, pembagian jalur untuk pelanggan terjauh, penentuan lokasi pemasangan, serta pemilihan aksesoris gardu distribusi yang tepat. Untuk WMN 121, trafo sisip 50 kVA dipasang 770 meter dari trafo utama dengan beban awal 30%. Untuk WMN 069, trafo sisip 50 kVA dipasang 642 meter dari trafo utama dengan beban awal 50%. Setelah pemasangan, beban trafo WMN 121 turun menjadi 54,8% dan tegangan di ujung menjadi 221,9 V (+ 0,8%). Beban trafo WMN 069 turun menjadi 45% dengan tegangan ujung 220,9 V (+ 0,4%). Hasilnya, kinerja trafo membaik dan pelanggan menikmati kontinuitas penyaluran tenaga listrik dengan kualitas yang lebih baik.

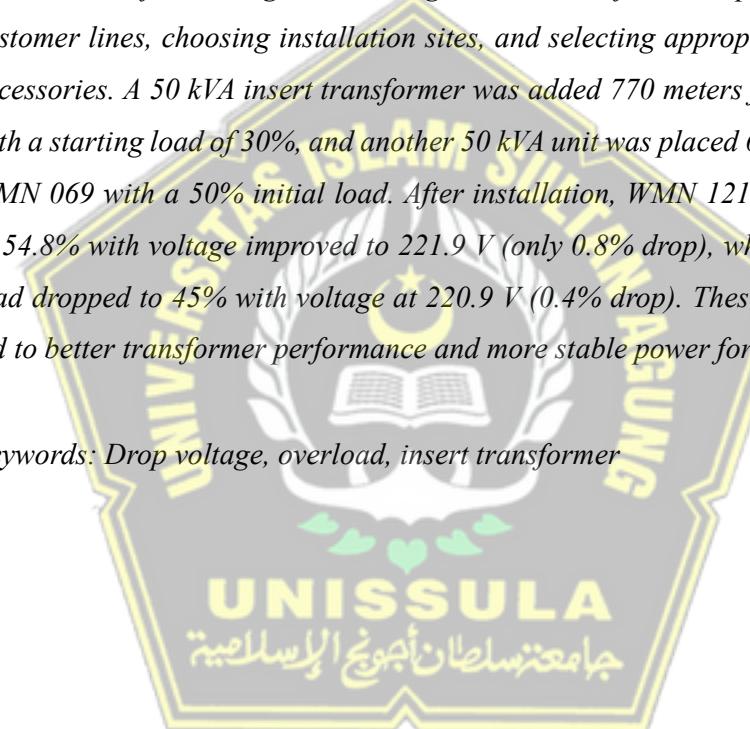
Kata kunci: *Penurunan tegangan, beban lebih, trafo sisip*

جامعة سلطان عبد العزiz الإسلامية

ABSTRACT

At ULP Wamena Kota, the Kaonak Feeder has two overloaded transformers: WMN121 and WMN069, each with a 100 kVA capacity, operating at 85% and 95% load. According to PLN regulation SE DIR No.0017/2014, this is not ideal. There's also a significant voltage drop at the farthest customers—16.6% for WMN 121 and 13.7% for WMN 069—exceeding the allowable limit of +5% to -10% set by SPLN No.1 of 1995. To solve this, insert transformers were installed. The plan involved load forecasting, determining the new transformer capacity, rerouting customer lines, choosing installation sites, and selecting appropriate substation accessories. A 50 kVA insert transformer was added 770 meters from WMN 121 with a starting load of 30%, and another 50 kVA unit was placed 642 meters from WMN 069 with a 50% initial load. After installation, WMN 121's load dropped to 54.8% with voltage improved to 221.9 V (only 0.8% drop), while WMN 069's load dropped to 45% with voltage at 220.9 V (0.4% drop). These improvements led to better transformer performance and more stable power for customers.

Keywords: Drop voltage, overload, insert transformer



BAB I

PENDAHULUAN

1. 1. Latar Belakang

Transformator distribusi merupakan komponen vital dalam sistem penyaluran energi listrik. Fungsi utama transformator distribusi adalah mengubah tegangan dari tegangan menengah 20 kV ke tegangan rendah yaitu 400 Volt yang selanjutnya digunakan untuk kebutuhan rumah tangga, komersial, atau industri. Transformator distribusi menjadi salah satu perangkat yang digunakan oleh PLN agar menghasilkan aliran listrik yang stabil, aman, dan efisien.

Seiring dengan bertambahnya jumlah pelanggan, maka pemantauan pembebanan pada trafo distribusi diperlukan untuk menghindari kelebihan beban atau *overload* yang dapat menyebabkan panas pada transformator. Panas yang terjadi pada trafo dapat menyebabkan isolasi di dalam trafo menjadi lebih cepat rusak, yang dapat berakibat pada kegagalan isolasi pada transformator.

PLN menetapkan bahwa tingkat beban pada transformator distribusi tidak boleh lebih dari 80% dari kapasitas daya yang terpasang. Sehingga kondisi transformator yang mengalami beban lebih dari 80 % selanjutnya disebut sebagai transformator *overload*. Kondisi ini dapat mempengaruhi tegangan keluaran dari transformator tersebut. Menurut SPLN T006 001 tahun 2013 jatuh tegangan hanya diperbolehkan maksimal – 10 % dari tegangan nominal.

Wilayah kerja ULP Wamena Kota memiliki 6 penyulang yang disuplai dari PLTD Sinakma dan PLTM Walesi (sistem *isolated*), dimana Penyulang Kaonak merupakan salah satu yang terpanjang diantara penyulang lainnya. Kota Wamena saat ini merupakan Ibu Kota Provinsi baru yaitu Provinsi Papua Pegunungan, sehingga pertumbuhan beban beberapa waktu terakhir sangat signifikan. Hal ini berdampak pada beberapa transformator yang berada pada wilayah kerja PT. PLN ULP Wamena Kota mengalami beban lebih dan penurunan tegangan ujung di pelanggan (*drop tegangan*).

Pada Penyulang Kaonak terdapat transformator yang mengalami hal tersebut. Diantaranya adalah WMN 121 dan WMN 069. Beban WMN 121 mencapai 85 % sedangkan WMN 069 mencapai 95 % dari kapasitas daya

Kapasitas transformator pada Gardu WMN 121 dan WMN 069 masing-masing sebesar 100 kVA. Pada permasalahan ini, opsi uprating kapasitas transformator tidak dipertimbangkan karena keterbatasan ketersediaan material transformator mulai dari kapasitas 160 kVA ke atas. Alternatif solusi berupa pemecahan beban JTR ke transformator terdekat juga tidak direkomendasikan, sebab distribusi beban yang tidak terkelompok menyebabkan jarak saluran JTR pada rata-rata gardu di ULP Wamena Kota menjadi terlalu panjang. Dengan mempertimbangkan kondisi tersebut, metode penambahan transformator sisip dipilih sebagai solusi paling efektif untuk menurunkan tingkat pembebanan transformator sekaligus meningkatkan tegangan pada sisi pelanggan.

Metode transformator sisip merupakan salah satu upaya untuk mengurangi beban pada transformator *eksisting* dengan membagi jalur pelanggan ke transformator baru, sehingga diharapkan umur pakai (*lifetime*) transformator dapat lebih panjang. Rencana pemasangan transformator sisip dilakukan secara paralel dengan penghantar JTM, menggunakan transformator tiga fasa. Penentuan estimasi jarak penempatan transformator akan dihitung berdasarkan perumusan teknis yang telah ditetapkan.

Analisis lebih jauh terkait dampak transformator sisip sangat diperlukan untuk memahami sejauh mana hal ini dapat membantu dalam menentukan langkah-langkah preventif yang dapat diambil untuk mencegah terjadinya transformator *overload* dan memperbaiki tegangan ujung pada pelanggan. Dengan demikian, ULP Wamena Kota dapat memastikan kontinuitas penyaluran tenaga listrik dan sesuai dengan standar kualitas yang diharapkan pelanggan.

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan maka dapat menjadi acuan dalam pembuatan laporan tugas akhir yang berjudul “ Analisis Rencana Pemasangan Transfomator Sisipan Untuk Mengatasi Beban Lebih dan Drop Tegangan Pada Wilayah Kerja PT. PLN (Persero) ULP Wamena Kota”

1. 2. Rumusan Masalah

Merujuk pada penjelasan latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam tugas akhir ini dapat disusun sebagai berikut:

1. Bagaimana kondisi presentase pembebanan dan drop tegangan pada transformator WMN 121 dan WMN 069 sebelum pemasangan transformator sisipan pada Penyulang Kaonak PT. PLN (Persero) ULP Wamena Kota?
2. Bagaimana perencanaan penempatan transformator sisipan pada Penyulang Kaonak PT. PLN (Persero) ULP Wamena Kota?
3. Bagaimana kondisi presentase pembebanan dan drop tegangan pada transformator WMN 121 dan WMN 069 setelah pemasangan transformator sisipan pada Penyulang Kaonak PT. PLN (Persero) ULP Wamena Kota?

1. 3. Batasan Masalah

Agar memastikan pembahasan tetap fokus dan terstruktur, diperlukan adanya batasan-batasan masalah dalam penyusunan tugas akhir ini. Adapun batasan-batasan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini hanya dilakukan perencanaan terhadap gardu WMN 121 dan WMN 069 yang mengalami beban lebih dan drop tegangan di Penyulang Kaonak PT. PLN (Persero) ULP Wamena Kota.
2. Tidak membahas SAIDI SAIFI, harmonisa, dan susut teknis.
3. Menggunakan aplikasi ETAP 12.6 untuk melakukan simulasi dan mengetahui tegangan ujung jaringan sebelum maupun sesudah penambahan transformator sisipan.
4. Pengumpulan data hanya dilakukan pada tahun 2022 sampai 2024

1. 4. Tujuan Penulisan

Tujuan dari penulisan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis kondisi presentase pembebanan dan drop tegangan pada transformator WMN 121 dan WMN 069 sebelum

- pemasangan transformator sisipan pada Penyulang Kaonak PT. PLN (Persero) ULP Wamena Kota.
2. Menganalisis perencanaan penempatan transformator sisipan pada Penyulang Kaonak di PT. PLN (Persero) ULP Wamena Kota.
 3. Menganalisis kondisi presentase pembebaran dan drop tegangan pada transformator WMN 121 dan WMN 069 sesudah pemasangan transformator sisipan pada Penyulang Kaonak PT. PLN (Persero) ULP Wamena Kota.

1. 5. Manfaat

1. Bagi peneliti, hasil ini bisa menjadi bahan belajar untuk menambah pengetahuan. Selain itu, juga bisa digunakan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya yang lebih luas dan mendalam.
2. Bagi perusahaan, hasil penelitian diharapkan memberikan sumbangan positif sebagai masukan untuk meningkatkan mutu tenaga listrik yang disalurkan ke konsumen.

1. 6. Sistematika Penulisan

Agar lebih mudah dalam memahami dan meninjau keseluruhan isi laporan akhir ini, perlu disampaikan sistematika yang berfungsi sebagai kerangka serta pedoman dalam penulisan. Adapun sistematika penulisan laporan akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagian Awal Laporan Akhir
Bagian awal memuat halaman sampul depan, halaman judul, halaman kata pengantar, halaman daftar isi, halaman daftar tabel, dan halaman daftar gambar.

2. Bagian Utama Laporan Akhir.

Pada bagian ini dikelompokkan menjadi beberapa bab dan sub bab yaitu :

- BAB I PENDAHULUAN

Bab ini mencakup latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan laporan akhir.

- BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab tinjauan pustaka ini meliputi :

- A. Analisis penelitian yang mencakup temuan-temuan dari penelitian sebelumnya yang relevan dengan penelitian yang sedang dilakukan.
- B. Landasan teori yang berisi tentang pembahasan jaringan sistem distribusi primer, jaringan sistem distribusi sekunder, gardu distribusi, transformator, prinsip kerja transformator, solusi transformator yang *overload*, penentuan letak transformator sisipan, kualitas daya listrik, gangguan pada transformator, program pemeliharaan, dan gambaran umum kondisi transformator yang akan dibahas pada laporan akhir.

- BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini, penulis menguraikan metode penelitian yang digunakan dalam laporan akhir. Agar tetap terstruktur, bab metode penelitian meliputi:

- A. Pemilihan lokasi serta waktu penelitian
- B. Metode pengambilan data
- C. Jenis data penelitian yang digunakan
- D. Langkah penulisan laporan akhir (disertakan *flowchart*)
- E. Langkah analisis data (disertakan *Flowchart*)

- BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memuat deskripsi hasil penelitian serta analisisnya, yang mencakup poin-poin berikut:

- A. Kondisi transformator *eksisting* sebelum pemasangan transformator sisipan
- B. Perencanaan pemasangan transformator sisipan
- C. Penentuan aksesoris gardu sisipan
- D. Analisis setelah pemasangan transformator sisipan
- E. Perbandingan Analisa perhitungan dengan ETAP

- BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan serta saran dari hasil penelitian. Kesimpulan mencakup masalah yang ditemukan dan solusinya, sementara saran berisi

rekomendasi untuk mengatasi masalah yang ada dalam ruang lingkup penelitian.

3. Bagian Akhir Laporan Akhir.

Bagian akhir dari laporan akhir ini berisi tentang daftar pustaka dan daftar lampiran.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2. 1. Kajian Pustaka

Menurut jurnal dari Angga Setia et al yang berjudul Studi Penambahan Gardu Sisipan Tipe Tiang untuk Mengatasi Beban Lebih di PT PLN (PERSERO) Area Cianjur Rayon Mande. Dalam penelitian ini dikatakan bahwa proses pemasangan gardu berawal dari tahapan yang pertama adalah melakukan penentuan lokasi. Pada tahap ini disarankan agar survey langsung agar lebih tepat dan terarah dalam penentuan titik Lokasi pemasangan gardu sisip. Tahap kedua adalah melakukan perhitungan terkait spesifikasi dari masing-masing komponen yang akan digunakan. Tahap ketiga melakukan analisis melalui *software* ETAP dengan tujuan agar dapat mengetahui apakah gardu dapat memenuhi kebutuhan beban. Tahap terakhir adalah melakukan evaluasi terhadap pengaruh gardu sisip terhadap beban dengan menggunakan hasil pengukuran beban gardu tersebut. Menurut SPLN No. 50 tahun 1997, pembebanan transformator ideal berada pada kisaran 50% hingga 60%. Namun, transformator dapat dibebani hingga 80% dari kapasitas terpasang dengan mempertimbangkan faktor susut umur, keragaman, dan keserempakan beban.

Menurut Jurnal dari ('Studi Analisis Penambahan Transformator Sisipan Untuk Menopang Beban Lebih Dan Drop Tegangan Pada Transformator Distribusi KA 1516 Penyulang Buduk Menggunakan Simulasi Program ETAP 7.0.', no date) yang berjudul Studi Analisis Penambahan Transformator Sisipan Untuk Menopang Beban lebih dan Drop Tegangan pada Transformator Distribusi KA 1516 Penyulang Buduk Menggunakan Simulasi ETAP 7.0. Pada penelitian tersebut dikatakan bahwa dalam melakukan pemilihan kapasitas trafo harus berdasarkan kapasitas beban yang akan dilayani dan beban yang akan dilayani oleh trafo tersebut jangan melebihi 80% dari daya trafo tersebut. Selain itu, hal yang harus diperhatikan adalah jarak trafo dengan beban yang akan dilayani tidak boleh terlalu jauh karena akan menyebabkan drop tegangan yang akan mengakibatkan kerugian pada sisi PLN dan pelanggan.

Menurut jurnal dari Partaonan Harahap yang berjudul Analisa Penambahan Trafo Sisip Distribusi 20 kV Mengurangi Beban Overload dan Jatuh tegangan pada Trafo BI 11 Rayon Tanah Jawa Dengan Simulasi ETAP 12.6.0. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kondisi pembebanan pada transformator BL 11 mengalami penurunan dari 95,99 % menjadi 64,54 % sehingga trafo tidak mengalami *overload*. Pemasangan trafo sisip tersebut juga memperbaiki tegangan ujung pada pelanggan yang awalnya 190,5 V menjadi 206 V.

Menurut jurnal dari Seniari, Fadli and Ginarsa, 2020 yang berjudul Analisis Rencana Pemasangan Transformator Sisipan Pada Saluran Transformator Distribusi Penyalang Pagutan. Dalam penelitian ini diakatakan bahwa dengan adanya trafo sisipan berpengaruh pada pembebanan trafo gardu AM097 dari 92,82 % menjadi 69,16 %. Selain itu nilai dari energi tak tersalur turun signifikan, dengan nilai nya menjadi 4159,35 W.

Perbedaan antara laporan akhir ini dengan jurnal-jurnal terdahulu terletak pada metode peramalan beban. Dalam penelitian ini, dilakukan peramalan pertumbuhan beban serta peramalan pembebanan trafo sisip untuk lima tahun ke depan, yang tidak dibahas secara mendalam dalam referensi jurnal sebelumnya. Analisis peramalan ini memberikan gambaran lebih akurat terhadap kebutuhan beban di masa mendatang.

Meskipun terdapat perbedaan signifikan dalam aspek peramalan, laporan akhir ini tetap memiliki beberapa kesamaan dengan jurnal-jurnal yang dijadikan referensi. Kesamaan tersebut meliputi metode perhitungan jarak optimal untuk penempatan gardu sisip, rincian material yang akan digunakan dalam sistem kelistrikan, serta penggunaan simulasi berbasis perangkat lunak ETAP 12.6 untuk mengevaluasi performa sistem.

2. 2. Landasan Teori

2. 2. 1. Jaringan Sistem Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer merupakan sistem kelistrikan yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu transmisi ke gardu distribusi. Tegangan pada jaringan primer, atau yang dikenal sebagai tegangan menengah, umumnya menggunakan sistem tiga fasa. Tujuan utama dari

jaringan distribusi primer adalah mendistribusikan energi listrik serta menjangkau area yang membutuhkan hingga ke gardu distribusi atau transformator. Jaringan ini mendapatkan suplai dari gardu hubung, baik secara langsung dari GI (gardu induk) maupun dari pusat-pusat pembangkit. Menurut konfigurasi yang digunakan, jaringan distribusi dapat dibagi menjadi empat jenis, yaitu sistem distribusi radial, loop, spindel, serta sistem cluster

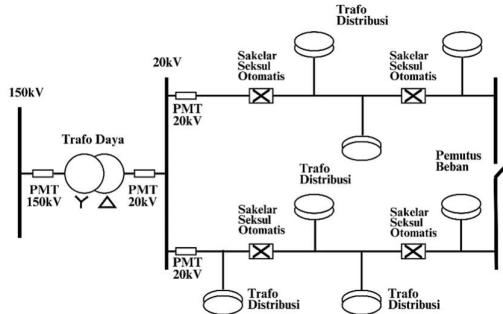
A. Sistem Jaringan Distribusi Radial

Tipe jaringan ini mempunyai bentuk paling sederhana, banyak digunakan, serta memiliki biaya yang relatif rendah. Jaringan ini disebut radial karena salurannya ditarik dari satu titik sumber utama secara radial, kemudian bercabang menuju berbagai titik beban yang dilayani, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1.



B. Sistem Jaringan Distribusi Loop

Jaringan tipe ini memiliki bentuk yang tertutup dan dikenal sebagai jaringan ring. Konfigurasi salurannya membentuk lingkaran, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2, yang memungkinkan setiap titik beban mendapatkan pasokan listrik dari dua arah. Hal ini meningkatkan kontinuitas dalam hal pelayanan serta memperbaiki kualitas daya, karena penurunan tegangan (*drop voltage*) dan rugi daya pada saluran menjadi lebih kecil.



Gambar 2. 2 Sistem Jaringan Distribusi Loop

Sumber:(Ridwan, 2024)

Bentuk sistem jaringan distribusi loop ini terdapat dua bentuk yaitu:

1. Bentuk *open loop*

Apabila dilengkapi dengan saklar *normally open* yang ditempatkan di salah satu bagian dari gardu distribusi, sehingga pada kondisi yang normal rangkaian selalu berada dalam keadaan terbuka.

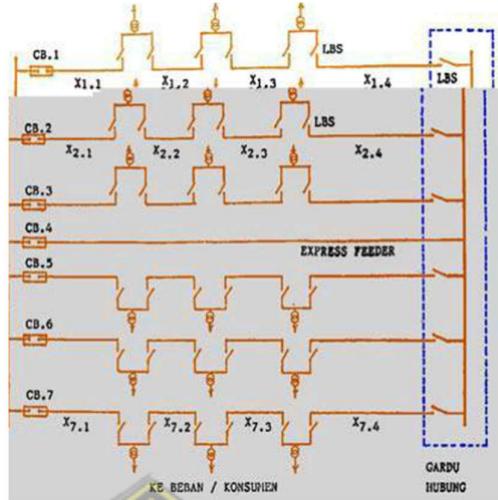
2. Bentuk *close loop*

Jika dipasang saklar *normally closed* di antara gardu distribusi, maka rangkaian akan tetap tertutup dalam kondisi normal.

3. Sistem Jaringan Distribusi Spindel

Jaringan distribusi spindle, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3, adalah sistem kabel tanah tegangan menengah yang dapat diterapkan di perkotaan. Sistem ini memiliki beberapa keunggulan, di antaranya:

- Meningkatkan keandalan dan kontinuitas pelayanan sistem.
- Mengurangi atau menekan kerugian akibat gangguan.
- Sangat efektif dalam menyuplai area dengan kepadatan beban tinggi, serta memungkinkan perluasan jaringan yang lebih mudah

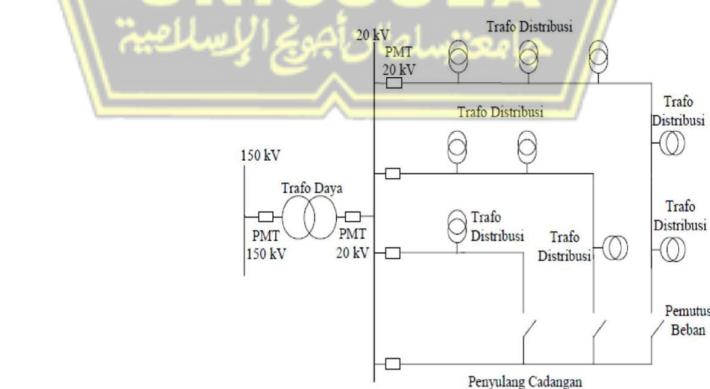


Gambar 2. 3 Sistem Jaringan Distribusi Spindel

Sumber: (Suhadi and Wrahatnolo, 2008)

4. Sistem Cluster

Sistem ini memiliki kesamaan dengan sistem jaringan spindle, namun perbedaannya terletak pada tidak digunakannya gardu hubung atau gardu switching dalam sistem cluster. Sebagai gantinya, digunakan *express feeder* yang langsung menghubungkan gardu hubung (GH) ke setiap jaringan serta berfungsi sebagai titik manuver yang memungkinkan penyesuaian aliran listrik saat terjadi gangguan jaringan pada titik tertentu.

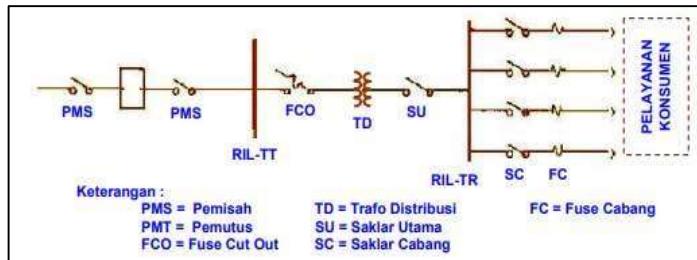


Gambar 2. 4 Sistem Cluster

Sumber : (Rumsory, 2022)

2. 2. 2. Jaringan Sistem Distribusi Sekunder

Sistem distribusi sekunder merupakan bagian dari sistem distribusi yang mencakup jalur dari gardu transformator hingga ke pelanggan .



Gambar 2. 5 Komponen Sistem distribusi sekunder

Sumber: (Suhadi and Wrahatnolo, 2008)

Dilihat dari posisinya, sistem distribusi ini merupakan bagian yang langsung terhubung dengan pelanggan. Fungsinya adalah menerima daya listrik dari transformator distribusi, kemudian menyalurkan serta mendistribusikannya ke pelanggan. Oleh karena itu, kualitas listrik harus dijaga dan diperhatikan dengan baik oleh PT. PLN (Persero).

Menurut SPLN 74 tahun 1987, tegangan rendah adalah sambungan rumah (SR) dari tiang JTR ke alat pembatas dan pengukur (APP), baik yang ditanam di tanah maupun di udara, termasuk perlengkapannya. Sistem distribusi sekunder berfungsi menyalurkan listrik dari gardu ke pelanggan. Umumnya digunakan sistem radial dengan kabel berisolasi atau tanpa isolasi. Sistem ini langsung terhubung ke pelanggan dan termasuk dalam kategori tegangan rendah.:

- Papan pembagi pada transformator distribusi.
- Hantaran tegangan rendah (saluran distribusi sekunder).
- Saluran Layanan Pelanggan (SLP) yang menghubungkan jaringan ke konsumen.
- kWh meter, serta fuse atau pengaman pada pelanggan.

2. 2. 3. Gardu Distribusi

Gardu distribusi listrik umumnya merupakan bangunan yang dilengkapi dengan Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB-TM), Transformator Distribusi, dan Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan

Rendah (PHB-TR). Fungsinya adalah untuk mendistribusikan listrik kepada pelanggan dengan tegangan menengah (20 kV) maupun tegangan rendah (220/380V).

Secara umum, gardu distribusi dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa aspek berikut:

1. Berdasarkan Jenis Pemasangan:
 - Gardu Pasangan Luar: Gardu Portal, Gardu Cantol
 - Gardu Pasangan Dalam: Gardu Beton, Gardu Kios
2. Berdasarkan Jenis Konstruksi:
 - Gardu Beton (bangunan berbahan batu atau beton)
 - Gardu Tiang: Gardu Portal dan Gardu Cantol
 - Gardu Kios
3. Berdasarkan Jenis Penggunaan:
 - Gardu Pelanggan Umum
 - Gardu Pelanggan Khusus
 - Gardu hubung berfungsi untuk memudahkan pengalihan beban antar penyulang. Gardu ini bisa saja dilengkapi dengan RTU (Remote Terminal Unit) atau tidak. Biasanya, juga dilengkapi dengan suplai DC dari transformator distribusi sendiri atau umum dalam satu kesatuan.

2. 2. 3. 1 Jenis-Jenis Gardu Distribusi

1. Gardu Portal



Gambar 2. 6 Gardu Portal

Sumber : (Kelompok Kerja Standar Kontruksi Disribusi Jaringan

Tenaga Listrik dan Pusat Penelitian Sains dan Teknologi Universitas

Indonesia, 2010)

Gardu portal adalah gardu transformator yang konstruksinya menggunakan dua tiang atau lebih. Gardu tiang yang terhubung dengan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) umumnya menggunakan konfigurasi T-section. Gardu ini dilengkapi dengan pengaman seperti Fuse Cut-Out (FCO) untuk melindungi transformator dari hubung singkat, serta Lightning Arrester (LA) untuk mencegah lonjakan tegangan akibat petir.

Sementara itu, untuk gardu tiang pada sistem jaringan lingkaran terbuka (*open loop*), onfigurasi peralatan menggunakan π -section.

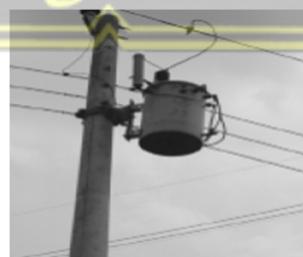


Gambar 2. 7 Bagan satu garis konfigurasi π section Gardu Portal

Sumber : (Kelompok Kerja Standar Kontruksi Disribusi Jaringan Tenaga Listrik dan Pusat Penelitian Sains dan Teknologi Universitas Indonesia, 2010)

2. Gardu Cantol

Gardu distribusi tipe cantol menggunakan transformator dengan kapasitas ≤ 100 kVA, baik untuk sistem tiga fase maupun satu fase.



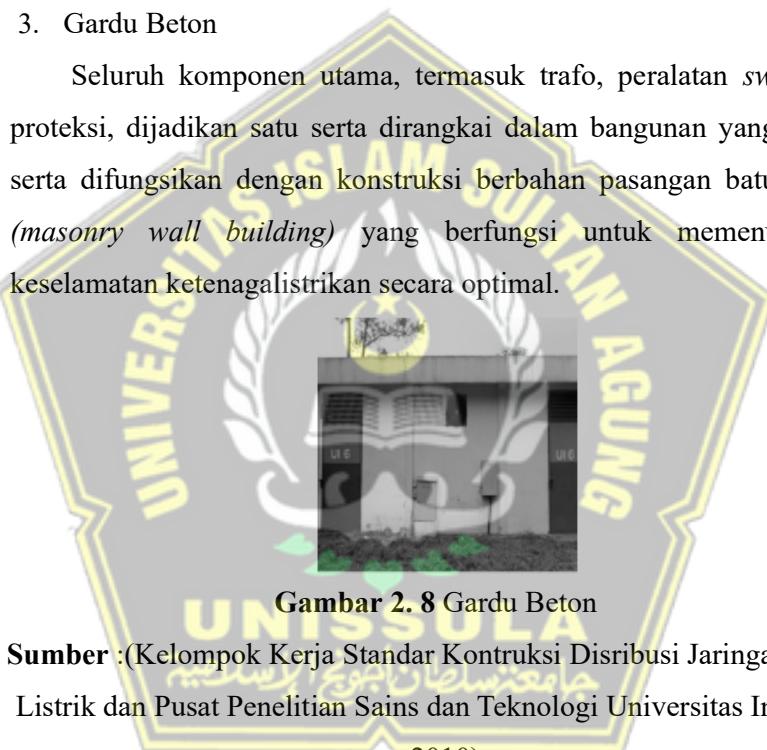
Gambar 2.9 Gardu Tipe Cantol

Sumber : (Kelompok Kerja Standar Kontruksi Disribusi Jaringan Tenaga Listrik dan Pusat Penelitian Sains dan Teknologi Universitas Indonesia, 2010)

Sebagai proteksi, pada trafo 3 fasa dipasang FCO untuk mengatasi gangguan hubung singkat fasa tanah dan fasa fasa dan terdapat lightning Arrester (LA) yang dipasang secara terpisah dengan penghantar pembumiannya yang langsung terhubung ke badan transformator. Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) dapat memiliki maksimal dua jalur dengan saklar pemisah pada sisi masuk serta pengaman lebur (jenis NH, NT) sebagai pelindung jalur distribusi. Semua Bagian Konduktif Terbuka (BKT) dan Bagian Konduktif Ekstra (BKE) dihubungkan ke sistem pembumian pada sisi tegangan rendah.

3. Gardu Beton

Seluruh komponen utama, termasuk trafo, peralatan *switching* dan proteksi, dijadikan satu serta dirangkai dalam bangunan yang dirancang, serta difungsikan dengan konstruksi berbahan pasangan batu dan beton (*masonry wall building*) yang berfungsi untuk memenuhi standar keselamatan ketenagalistrikan secara optimal.



Gambar 2. 8 Gardu Beton

Sumber :(Kelompok Kerja Standar Kontruksi Disribusi Jaringan Tenaga Listrik dan Pusat Penelitian Sains dan Teknologi Universitas Indonesia, 2010)

4. Gardu Kios

Gardu Gardu tipe ini terbuat dari baja, fiberglass, atau keduanya, dan bisa dirakit langsung di lokasi. Ada beberapa jenisnya, yaitu Kios Kompak, Kios Modular, dan Kios Bertingkat. Gardu ini dibangun di tempat yang tidak memungkinkan untuk membuat Gardu Beton. Karena sifatnya yang mobile, kapasitas transformator yang bisa dipasang terbatas, maksimal 400 kVA dan empat jalur tegangan rendah. Untuk Kios Kompak, semua

komponen sudah dirakit di pabrik, jadi bisa langsung diangkut ke lokasi dan dihubungkan ke sistem distribusi.



Gambar 2. 9 Gardu Kios

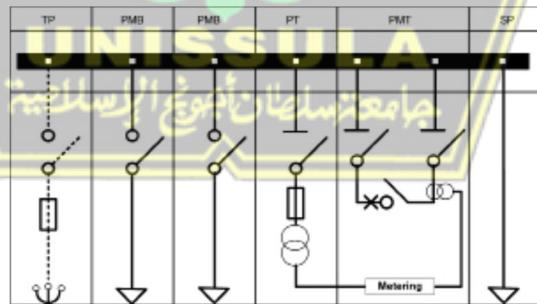
Sumber : (Kelompok Kerja Standar Kontruksi Disribusi Jaringan Tenaga Listrik dan Pusat Penelitian Sains dan Teknologi Universitas Indonesia, 2010)

5. Gardu Pelanggan Khusus (Suplai Jaringan TM)

Gardu jenis ini dirancang guna menyediakan sambungan tenaga listrik bagi konsumen daya besar. Selain perangkat hubung dan proteksi, gardu ini dilengkapi dengan alat ukur.

Untuk pemasangan pada pelanggan dengan daya $> 197 \text{ kVA}$, komponen utama gardu distribusi meliputi perlengkapan hubung bagi tegangan menengah (PHB-TM), sistem proteksi, dan peralatan pengukuran tegangan menengah.

Secara umum, gardu pelanggan khusus dapat dilengkapi dengan trafo tambahan untuk melayani pelanggan umum.



Gambar 2. 10 Bagan satu garis Gardu Pelanggan Khusus

(Sumber : (Kelompok Kerja Standar Kontruksi Disribusi Jaringan Tenaga Listrik dan Pusat Penelitian Sains dan Teknologi Universitas Indonesia, 2010)

Keterangan :

- TP = Pengaman Transformator
- PMB = Pemutus Beban – LBS
- PT = Transformator Tegangan
- PMT = Pembatas Beban Pelanggan
- SP = Sambungan Pelanggan

2. 2. 4. Transformator

Transformator adalah peralatan listrik yang berfungsi menyalurkan tenaga listrik dari satu level tegangan ke level tegangan yang lebih rendah, dengan tetap mempertahankan frekuensi yang sama. Transformator bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik, sesuai dengan hukum Ampere dan induksi Faraday, di mana perubahan arus dalam medan listrik dapat menghasilkan medan magnet, sementara perubahan medan magnet atau fluks magnet dapat membangkitkan tegangan induksi.

Dalam sistem penyaluran tenaga listrik, transformator diklasifikasikan menjadi beberapa jenis:

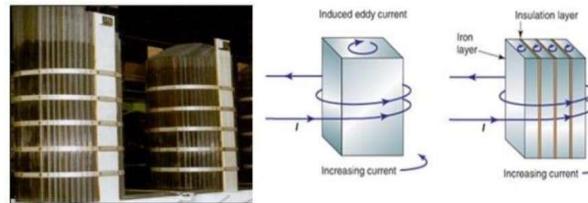
1. Trafo Penaik Tegangan (Step-Up) atau sering disebut trafo daya, digunakan untuk meningkatkan tegangan dari pembangkit agar sesuai dengan kebutuhan transmisi.
2. Trafo Penurun Tegangan (Step-Down) atau sering disebut trafo distribusi, berfungsi menurunkan tegangan dari kelas tegangan tinggi menjadi tegangan dibawahnya (distribusi) untuk keperluan pengguna akhir.
3. Trafo Instrumen, digunakan untuk melakukan pengukuran, yang didalamnya terdiri dari trafo tegangan (PT) dan trafo arus (CT). Trafo ini berfungsi menurunkan tegangan dan arus agar dapat diukur dengan meter pengukuran secara lebih aman dan akurat.

2. 2. 4. 1 Bagian-bagian Transformator dan Fungsinya

A. Electromagnetic Circuit (Inti besi)

Inti dari trafo biasanya dibuat dari baja silikon karena memiliki permeabilitas yang tinggi dan menghasilkan rugi histeresis yang lebih kecil dibandingkan dengan logam lain. Inti ini terdiri atas lembaran-

lembaran baja yang dibentuk sesuai kebutuhan desain dan dilapisi dengan bahan isolator

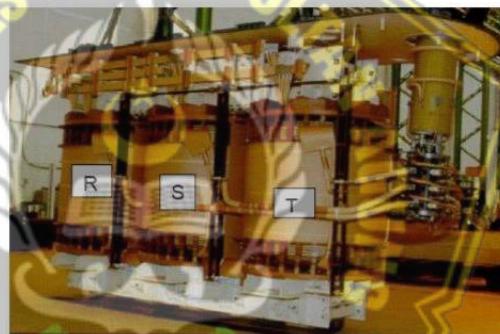


Gambar 2. 11 Inti Besi Transformator

Sumber : (Rusdaja, 2014)

B. Current Carrying Circuit (Winding)

Belitan terdiri dari batang tembaga berisolasi yang mengelilingi inti besi, dimana saat arus bolak-balik mengalir pada belitan tembaga tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan fluks magnetik.



Gambar 2. 12 Belitan trafo

Sumber : (Rusdaja, 2014)

C. Bushing

Bushing adalah komponen yang berfungsi sebagai penghubung antara belitan transformator dengan jaringan listrik eksternal. Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang dilapisi oleh isolator, yang berperan sebagai penyekat untuk mencegah hubungan listrik antara konduktor bushing dan badan utama (main tank) transformator.



Gambar 2. 13 Bushing

Sumber : (Rusdaja, 2014)

D. Pendingin

Pada dasarnya, transformator tidak boleh dibebani secara berlebihan karena dapat menyebabkan peningkatan suhu yang berlebihan, yang pada akhirnya dapat memperpendek umur operasionalnya. Untuk mengatasi hal ini, transformator dilengkapi dengan sistem pendingin yang menggunakan minyak atau udara di sekitarnya.

Terdapat empat jenis sistem pendinginan pada transformator:

1. Transformator ONAN (Oil Natural Air Natural)

Menggunakan minyak sebagai pendingin belitan yang bersirkulasi secara alami, serta udara sebagai pendingin luar yang juga bersirkulasi secara alami.

2. Transformator ONAF (Oil Natural Air Forced)

Memanfaatkan minyak yang bersirkulasi secara alami sebagai pendingin belitan, sedangkan udara luar didinginkan dengan bantuan kipas atau sistem paksa.

3. Transformator OFAF (Oil Forced Air Forced)

Menggunakan sistem paksa untuk mensirkulasikan minyak sebagai pendingin belitan, serta udara luar juga didinginkan dengan cara paksa menggunakan kipas atau alat bantu lainnya.

4. Transformator OFWF (Oil Forced Water Forced)

Menggunakan minyak yang bersirkulasi secara paksa sebagai pendingin belitan, sementara pendingin luar menggunakan air yang juga disirkulasikan secara paksa untuk menjaga suhu tetap stabil.

No	Macam Sistem Pendingin	Media			
		Dalam Trafo		Luar Trafo	
		Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa
1	AN			Udara	
2	AF				Udara
3	ONAN	Minyak		Udara	
4	ONAF	Minyak			Udara
5	OFAN		Minyak	Udara	
6	OFAF		Minyak		Udara
7	OFWF		Minyak		Air
8	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

Tabel 2. 1 Macam – Macam Pendingin Trafo**Sumber:** (Rusdjaja, 2014)**2. 2. 4. 2 Prinsip Kerja Transformator**

Prinsip kerja utama transformator didasarkan pada Hukum Induksi Faraday. Hukum ini menyatakan bahwa perubahan medan magnet pada sebuah kumparan akan menghasilkan gaya gerak listrik (GGL) induksi, yang besarnya sebanding dengan kecepatan perubahan fluks magnetik. Nilai GGL yang dihasilkan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$d\emptyset$$

$$e = -N \frac{d\emptyset}{dt} \quad \dots \dots \dots \quad 2.1$$

$$dt$$

e = gaya gerak listrik (volt)

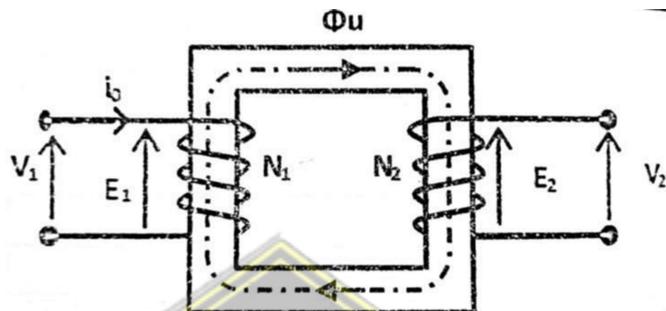
N = jumlah lilitan

$\frac{d\Phi}{dt}$ = perubahan fluks magnet (weber/sec)

(**Sumber:** Rachmat, 2017:25)

Transformator memiliki 2 prinsip kerja, yaitu transformator dalam keadaan tanpa beban (*No Load*) dan transformator dalam keadaan berbeban (*Load*).

A. Keadaan Transformator Tanpa Beban (*No Load*)



Gambar 2. 14 Transformator Dalam Keadaan Tanpa Beban

(Sumber: Rachmat, 2017:25)

Bila kumparan primer dari suatu trafo dihubungkan dengan sumber tegangan (V_1) yang sinusoidal, maka akan mengalirkan arus primer (I_0) yang juga sinusoidal. Arus primer I_0 menimbulkan fluks yang sefasa dan juga berbentuk sinusoid dan biasanya disebut dengan fluksi utama Φ_U . Karena fluks tersebut berbentuk sinusoid maka besarnya fluks selalu berubah-ubah setiap waktunya $d\Phi/dt$. Kemudian fluks tersebut akan berinteraksi dengan kumparan N_1 dan akan terjadi proses induksi elektromagnetik yang menghasilkan tegangan induksi E_1 .

$$E_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \dots \dots \dots \quad 2.2$$

(Sumber: Rachmat, 2017:25)

Pada prinsip kerja ini transformator dalam keadaan tanpa beban dan dianggap ideal (rugi-rugi diabaikan sehingga besarnya E_1 sama dengan V_1). Inti besi pada transformator menghubungkan kumparan pada sisi primer dan kumparan pada sisi sekunder. Fluksi dari belitan primer akan menginduksi ke belitan sekunder melalui inti besi sehingga fluksi dari belitan primer tersebut dinamakan fluksi bersama

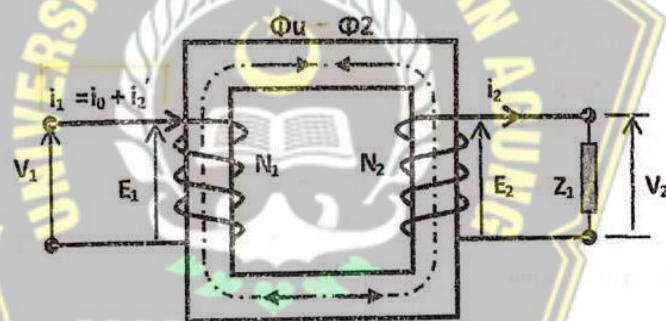
karena akan berpengaruh pada dua belitan yang ada di dalam transformator. Kemudian fluksi bersama tersebut akan berinteraksi dengan kumparan N_2 , sehingga terjadi proses induksi elektromagnetik yang menghasilkan tegangan induksi E_2 pada kumparan sekunder.

$$E_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad \dots \dots \dots \quad 2.3$$

(Sumber: Rachmat, 2017:25)

Dengan adanya E_2 pada belitan sekunder maka pada terminal output transformator dapat diukur besarnya tegangan output (V_2) yang besarnya sama dengan E_2 karena trafo dianggap ideal (rugi rugi diabaikan). (Rachmat, 2017:25)

B. Keadaan Transformator Berbeban (Load)



Gambar 2.15 Transformator Dalam Keadaan Berbeban

(Sumber: Rachmat, 2017:27)

Saat transformator dibebani dengan beban Z_1 maka pada belitan sekunder akan mengalir arus I_2 . Arus I_2 tersebut akan menimbulkan fluksi Φ_2 yang arahnya berlawanan dengan Φ_1 atau fluksi utama (Φ_U), maka dari itu Φ_2 dinamakan dengan fluksi lawan. Φ_2 ini akan melawan Φ_U dan mengurangi besarnya Φ_U dari belitan primer sehingga mengakibatkan berkurangnya GGL yang dibangkitkan di sisi primer (E_1).

Dengan berkurangnya E_1 maka akan timbul beda potensial antara V_1 dengan E_1 yang berakibat naiknya arus di sisi primer.

Besarnya kenaikan arus di sisi primer sebanding dengan besarnya I_2' (arus sisi sekunder yang ditransfer ke sisi primer) sehingga arus sisi primer I_0 (arus dalam kondisi tanpa beban) akan berubah menjadi I_1 dimana $I_1 = I_0 + I_2'$.

Semakin besar beban yang dipasang di sisi sekunder berakibat naiknya arus sisi sekunder yang juga berakibat naiknya pula arus primer (I_1). Dengan adanya kenaikan arus di sisi primer maka akan berakibat naiknya fluksi Bersama (Φ_u) yang dihasilkan pada sisi primer sehingga mengkompensasi berkurangnya fluksi yang diakibatkan oleh fluksi lawan (Φ_2). Hal ini mengakibatkan besarnya fluksi di dalam inti besi selalu tetap atau stabil (kestabilan fluksi di dalam inti transformator) dan sekaligus menaikkan kembali besarnya induk E_1 sehingga besarnya E_1 sama dengan V_1 . Semua proses tersebut sekaligus menjelaskan terjadinya proses transfer energi dari sisi primer (input) ke sisi sekunder (output/beban). (Rachmat, 2017:27)

2. 2. 4. 3 Perhitungan Arus Beban Penuh Transformator

Kapsitas daya transformator jika ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat diketahui melalui persamaan sebagai berikut:

Dimane:

$S = \text{daya transformator (kVA)}$

V ≡ tegangan sisi primer transformator

$J \equiv \text{Arus}(A)$

Sehim

dapat menggunakan persamaan :

$\frac{S}{\sqrt{N}}$

Demand:

T - Alus seball Tchun (A)

S = Daya transformator (kVA)

V=Tegangan sisi sekunder transformator fasa-fasa (V)

Menghitung persentase beban transformator :

Perhitungan persentase jatuh tegangan :

Keterangan :

ΔV = Jatuh tegangan (Drop Voltage) (V)

V_s = Tegangan kirim atau tegangan sekunder transformator (V)

V_r = Tegangan terima konsumen (V)

2. 2. 4. 4 Beban Lebih /Overload

Gangguan karena beban berlebih (*overload*) bukan termasuk gangguan murni, melainkan kondisi tidak normal yang dapat merusak peralatan listrik jika dibiarkan dalam waktu lama. Saat terjadi overload, arus yang mengalir melebihi kapasitas maksimum peralatan dan sistem proteksi yang telah dipasang.

A. Penyebab Terjadinya Overload

Transformator distribusi adalah elemen penting dalam jaringan distribusi tegangan menengah, namun kerap menghadapi gangguan, salah satunya beban lebih (*overload*). Gangguan ini terjadi ketika beban yang tersambung ke transformator melampaui batas kapasitas yang dapat ditanganiinya.

Beberapa faktor penyebab *overload* antara lain:

- Peningkatan beban secara bertahap seiring waktu.
 - Perubahan atau manuver aliran beban akibat gangguan di jaringan listrik.

Overload menyebabkan transformator mengalami kenaikan suhu, terutama pada lilitan kumparannya. Jika suhu lilitan terus meningkat, isolasi pada kumparan dapat rusak, yang berisiko menyebabkan kegagalan transformator dan gangguan dalam penyaluran listrik ke pelanggan.

Menurut SPLN (Standar Perusahaan Listrik Negara), transformator distribusi idealnya beroperasi dalam rentang beban 40% hingga 80% dari kapasitasnya. Jika beban melebihi atau kurang dari rentang ini, transformator dapat dikategorikan sebagai overload atau underload.

B. Akibat Terjadinya Overload

Overload pada transformator dapat menyebabkan kerugian, terutama bagi PLN. Dampak utama overload antara lain:

- Penurunan Keandalan Sistem.

Beban lebih dapat mengganggu keandalan sistem distribusi. Keandalan sistem berarti sistem beroperasi dengan baik, tegangan stabil, dan tidak melebihi batas yang ditetapkan oleh SPLN No. 72 Tahun 1987, yaitu -10% dari tegangan nominal.

- Kerusakan Peralatan Distribusi

Overload dapat mempercepat kerusakan berbagai peralatan distribusi, termasuk transformator, kabel listrik, dan komponen distribusi lainnya. Hal ini berpotensi meningkatkan biaya perawatan dan penggantian peralatan bagi perusahaan.

2. 2. 4. 5 Solusi Transformator yang Mengalami *Overload*

A. Mutasi

Mutasi transformator merupakan salah satu upaya dalam pengelolaan transformator distribusi yang terpasang di jaringan, yang bertujuan untuk menyesuaikan kapasitas transformator dengan beban. Cara ini dilakukan dengan mengganti trafo lama dengan yang memiliki kapasitas lebih besar.

B. Trafo Sisip

Metode yang dimaksud dengan sisip gardu adalah penambahan gardu yang ada dengan syarat transformator sebelum sisip mengalami *drop* tegangan ataupun beban *overload*. Agar sistem distribusi tetap andal, maka prosentase pembebanan pada transformator distribusi tersebut jangan

sampai melebihi ketentuan yaitu 80% dari bebananya. Menurut SE DIR 0017E/2014, transformator dapat dikatakan dalam kondisi kurang apabila pembebanan antara 80 % - 100 dari kapasitas trafo. Sehingga untuk dapat mengatasi permasalahan *overload* pada transformator maka dapat dilakukan penambahan transformator sisipan. Pemasangan gardu sisipan diharapkan akan menimbulkan dampak baik dalam penyaluran energi listrik.

2. 2. 5. Letak Transformator Sisipan

Transformator yang dipasang terlalu jauh dari beban yang dilayani dapat menimbulkan rugi tegangan yang cukup besar. Oleh karena itu, penting untuk memperhatikan jarak maksimum antara transformator distribusi dan pelanggan (Sutawinaya, Teresna, & Setyacahyana P, 2014). Adapun penempatan transformator sisipan dari transformator utama dilakukan dengan pertimbangan sebagai berikut:

Keterangan:

L = Jarak penempatan (km)

R = Tahanan pengantar (Ω)

I = Arus yang mengaliri penghantar (A)

V_{IVC} = Tegangan fasa-fasa pada sekunder trafo (V)

10% = Drop Tegangan pada pengantar yang diizinkan (V)

Untuk IWBP dapat ditemukan dengan membuat rata rata arus pada fasa R, S dan T pada waktu beban puncak seperti berikut ini.

Untuk R dapat dicari dengan rumus sebagai berikut.

Keterangan:

ρ = Hambatan Jenis (CMΩ/ft)

L = Panjang penghantar JTR (ft)

A = Luas Penampang (CM)

Untuk satuan panjang penghantar yang digunakan adalah feet (ft) dan diameter penghantar adalah circular mil (CM). Untuk nilai 1 meter sama dengan 3,28 ft dan 1 mm² sama dengan 1973,52 CM. Nilai ρ memiliki satuan CM Ω /ft yang setiap hambatan jenis dari berbagai material berbeda beda yang dapat dilihat pada gambar 2.17.

Material	ρ @ 20°C
Silver	9.9
Copper	10.31
Gold	14.7
Aluminum	17.0
Tungsten	33.0
Nickel	47.0
Iron	74.0
Constantan	295.0
Nichrome	600.0
Calorite	720.0
Carbon	21,000.0

Gambar 2.16 Hambatan Jenis (ρ) Setiap Material

Sumber : (Khalifa, 2019)

2. 2. 6. Kualitas Daya Listrik

Secara umum, kualitas sistem penyaluran dan distribusi tenaga listrik dinilai berdasarkan kualitas daya yang diterima oleh konsumen. Kualitas daya yang baik mencakup kapasitas daya yang memadai serta tegangan yang stabil dan sesuai dengan nilai nominalnya.

Menjaga tegangan tetap konstan sangat penting, terutama dalam mengurangi rugi tegangan di ujung saluran. Tegangan yang tidak stabil dapat merusak perangkat elektronik yang sensitif terhadap fluktuasi tegangan. Tegangan yang terlalu rendah dapat menyebabkan peralatan listrik tidak

beroperasi dengan optimal, sementara tegangan yang terlalu tinggi berisiko merusak perangkat listrik (Suhadi and Wrahatnolo, 2008). Oleh karena itu, salah satu syarat utama penyambungan peralatan listrik adalah kesesuaian tegangan sumber dengan tegangan yang dibutuhkan oleh perangkat tersebut.

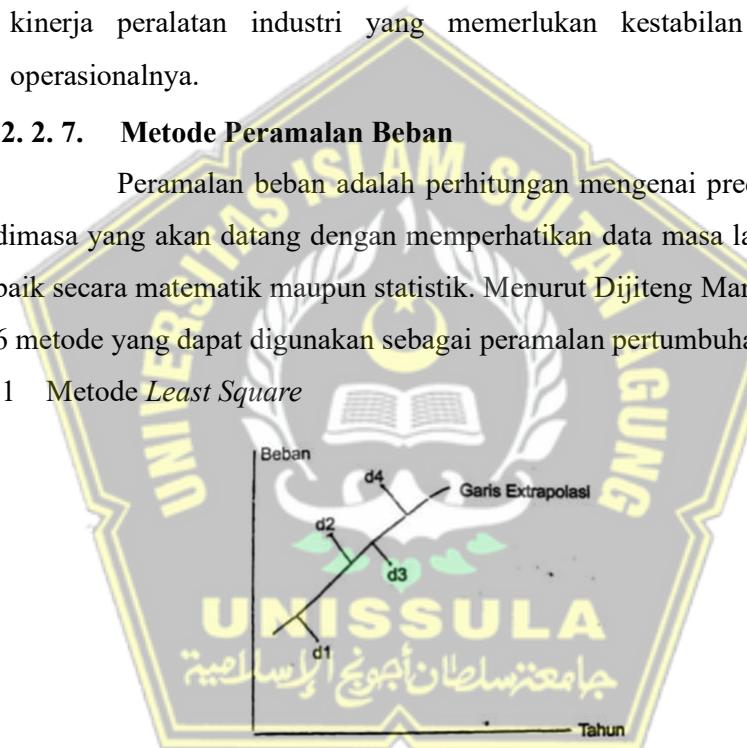
Berdasarkan SPLN 1 Tahun 1995, batas toleransi tegangan pelayanan adalah +5% hingga -10% dari tegangan nominal 230V.

Selain tegangan, kestabilan frekuensi juga sangat penting, terutama bagi industri yang bergantung pada presisi waktu dan frekuensi dalam pengoperasian mesin otomatis. Perubahan frekuensi dapat mengganggu kinerja peralatan industri yang memerlukan kestabilan tinggi dalam operasionalnya.

2. 2. 7. Metode Peramalan Beban

Peramalan beban adalah perhitungan mengenai prediksi suatu nilai dimasa yang akan datang dengan memperhatikan data masa lalu atau saat ini baik secara matematik maupun statistik. Menurut Dijiteng Marsudi, 2006 ada 6 metode yang dapat digunakan sebagai peramalan pertumbuhan beban, yaitu:

- 1 Metode *Least Square*

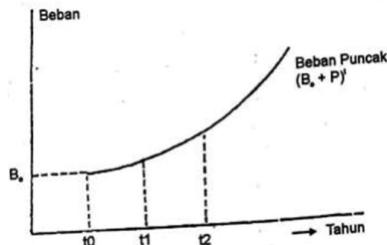


Gambar 2. 17 Grafik Peramalan Beban dengan Metode *Least Square*

Sumber : (Marsudi, 2016)

Metode ini dapat dipakai untuk memperkirakan beban puncak yang akan terjadi di sistem tenaga listrik untuk beberapa tahun yang akan datang dengan beban di masa-masa yang silam dicatat dan kemudian ditarik garis ekstrapolasi.

2. Metode Exponensial



Gambar 2. 18 Grafik Peramalan Beban dengan Metode Exponensial

Sumber : (Marsudi, 2016)

Keterangan:

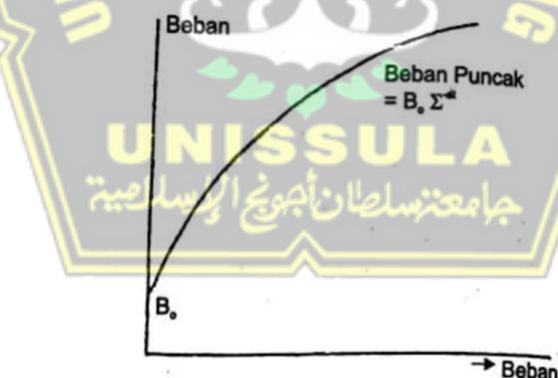
B_0 = Beban puncak pada saat sekarang

p = Presentase kenaikan beban per tahun yang ditargetkan

t = jumlah tahun yang akan datang

Metode ini dipakai jika sistem tenaga listrik yang dibahas masih jauh dari kejemuhan dan ada suatu target kenaikan penjualan yang digariskan.

3. Metode *Curve Fit*



Gambar 2. 19 Grafik Peramalan Beban dengan Metode *Curve Fit*

Sumber : (Marsudi, 2016)

Keterangan:

B_0 = Beban puncak pada saat sekarang

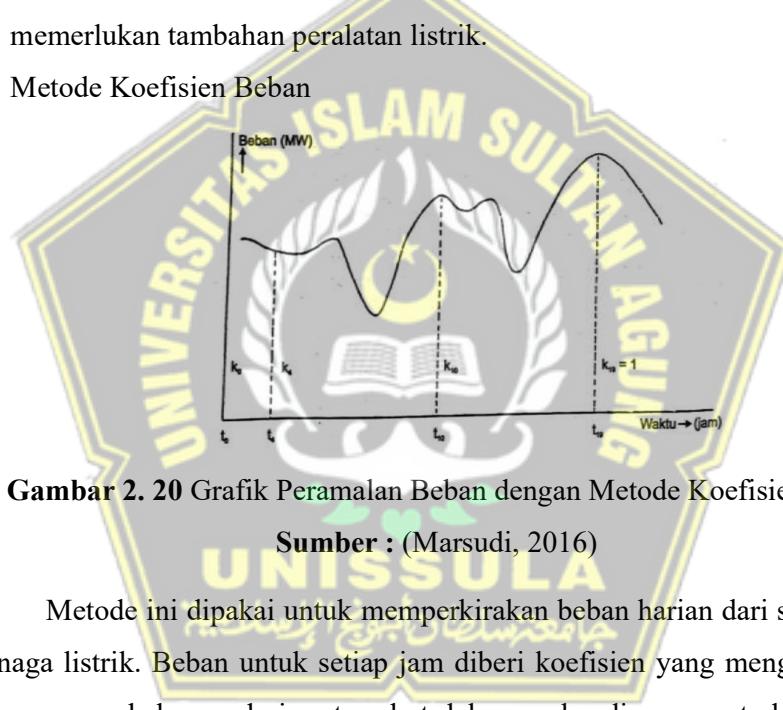
t = Jumlah tahun yad

t = Konstanta yang dicari secara coba-coba

Metode ini dapat dipakai apabila sudah terlihat adanya kejemuhan pada sistem tenaga listrik yang dibahas. Kejemuhan bisa terjadi misalnya karena semua orang telah memakai tenaga listrik dan tidak ada pengembangan industri.

Dalam praktek kejemuhan dapat dilihat pada pusat-pusat beban (Gardu induk dan Gardu Distribusi) yang sekitarnya penuh dengan perumahan tempat tinggal. Penambahan beban hanya terjadi kalau ada pemakai listrik ditempat tersebut yang menambah peralatan listriknya, misalnya apabila ada pemakai listrik yang memperbesar rumahnya (menambah tingkat rumahnya) sehingga memerlukan tambahan peralatan listrik.

4. Metode Koefisien Beban



Gambar 2. 20 Grafik Peramalan Beban dengan Metode Koefisien Beban

Sumber : (Marsudi, 2016)

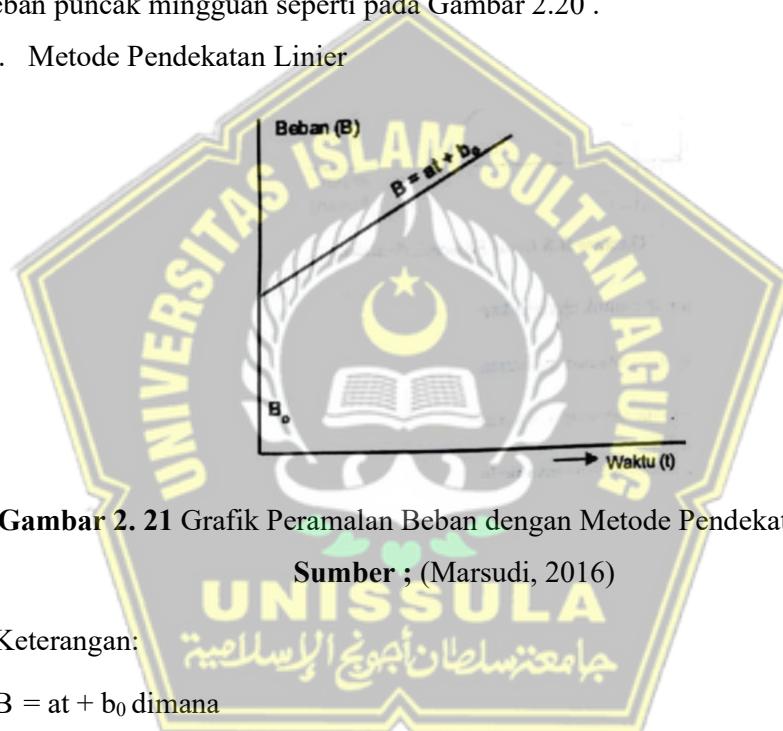
Metode ini dipakai untuk memperkirakan beban harian dari suatu sistem tenaga listrik. Beban untuk setiap jam diberi koefisien yang menggambarkan besarnya ambeban pada jam tersebut dalam perbandingannya terhadap beban puncak , misalnya $k_1 = 0,6$ berarti bahwa beban pada jam 04.00 adalah sebesar 0,6 kali beban puncak yang terjadi pada jam 19.00 ($K = 1$) , lihat gambar II.6 .

Koefisien - koefisien ini berbeda untuk hari Senin s/d Minggu dan juga untuk hari libur bukan Minggu. Beban puncak dapat diperkirakan dengan melihat beban puncak mingguan tahun - tahun yang lalu kemudian dengan menggunakan koefisien-koefisien tersebut diatas bisa diperkirakan grafik beban harian untuk suatu minggu yang akan datang. Koefisien-koefisien ini perlu dikoreksi secara terus menerus berdasarkan hasil pengamatan atas beban yang

sesungguhnya terjadi.

Setelah didapat perkiraan grafik beban harian dengan metode koefisien masih perlu dilakukan koreksi-koreksi berdasarkan informasi-informasi terakhir mengenai perkiraan suhu dan kegiatan masyarakat . Jika setelah koreksi-koreksi ini ternyata masih ada penyimpangan dalam operasi real time, maka adalah tugas operatior sistem (*dispatcher*) untuk mengatasi penyimpangan ini. Apabila telah didapat koefisien beban puncak mingguan selama satu tahun (52 minggu) maka metode ini dapat pula dikembangkan untuk perkiraan beban puncak mingguan tertinggi dalam satu tahun , dengan memperhatikan langgam beban puncak mingguan seperti pada Gambar 2.20 .

5. Metode Pendekatan Linier



Gambar 2. 21 Grafik Peramalan Beban dengan Metode Pendekatan Linier

Sumber ; (Marsudi, 2016)

Keterangan:

$$B = at + b_0 \text{ dimana}$$

$$B = \text{beban pada saat } t$$

$$a = \text{suatu konstanta yang harus ditentukan}$$

$$b_0 = \text{beban pada saat } t=t_0$$

Konstanta a sesungguhnya tergantung pada waktu t dan besarnya b_0

Metode ini hanya dapat dipakai untuk perkiraan beban beberapa puluh menit ke depan dan biasanya konstanta a juga tergantung kepada ramalan cuaca.

6. Metode *Markov*

Metode ini dipakai untuk memperkirakan beban puncak sistem tenaga listrik dalam jangka panjang dengan memperhitungkan kegiatan-kegiatan ekonomi dalam suatu negara secara makro.

Dengan beracuan pada 6 metode menurut Dijiteng Marsudi, 2006 maka metode peramalan beban yang digunakan adalah metode *Least Square*, karena metode ini dapat dipakai untuk memperkirakan beban puncak yang akan terjadi di untuk beberapa tahun yang akan datang serta berdasarkan keberagaman jenis konsumen yang disuplai oleh gardu distribusi, yaitu tidak hanya konsumen rumah tangga, tetapi juga konsumen industri dan komersial. Persamaan penentuan parameter metode *Least Square* sebagai berikut:

$$Y_n = a + bx$$

Keterangan :

a dan b = koefisien

Y = diasumsikan Jumlah Beban (kVA)

n = banyak tahun

x = waktu tertentu dalam bentuk kode

Dalam menentukan nilai x seringkali digunakan teknik alternatif dengan memberikan skor atau kode. Dalam hal ini dilakukan pembagian data menjadi dua kelompok, yaitu:

1. Data genap, maka skor x nya:, -5, -3, -1, 1, 3, 5,
2. Data ganjil, maka skor x nya:, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, ...

Kemudian untuk mengetahui koefisien a dan b dapat dicari menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$a = \frac{\sum Y}{n}$$

$$b = \frac{\sum XY}{\sum X^2}$$

2. 2. 8. Gangguan dan Kerusakan Pada Transformator

Transformator dapat mengalami berbagai gangguan selama beroperasi, yang dalam beberapa kasus dapat menyebabkan kerusakan serius. Gangguan

tersebut dapat disebabkan oleh faktor eksternal seperti bencana alam, sambaran petir, tertimpa pohon, serta faktor internal seperti hubung singkat, beban lebih, beban tidak seimbang, kerusakan minyak trafo, atau kegagalan sistem proteksi.

Secara umum, gangguan pada transformator dapat dikategorikan menjadi tiga jenis utama:

1. Gangguan Mekanis

Gangguan ini berkaitan dengan kerusakan fisik atau isolasi di dalam tangki transformator, termasuk:

- Kerusakan pada permukaan dalam tangki
- Kebocoran pada lubang tangki
- Kerusakan pada bushing dan pipa

2. Gangguan Elektris

Gangguan ini melibatkan masalah kelistrikan yang dapat mengganggu operasi transformator, seperti:

- Tahanan isolasi rendah, yang dapat menyebabkan kebocoran arus
- Isolasi tembus, yang dapat mengakibatkan gangguan hubung singkat

1. Gangguan Magnetis

Gangguan ini berkaitan dengan sistem magnetisasi transformator, meliputi:

- Kerusakan pada laminasi inti
- Isolasi tembus antara lapisan laminasi
- Gangguan pada inti besi, yang dapat mengurangi efisiensi transformator dan meningkatkan rugi daya

Untuk menjaga kinerja transformator tetap optimal, diperlukan pemeliharaan rutin serta sistem proteksi yang berfungsi dengan baik guna mencegah gangguan yang dapat merugikan sistem distribusi listrik.

2. 2. 9. Program Pemeliharaan

Pemeliharaan adalah serangkaian tindakan yang bertujuan untuk menjaga kondisi transformator agar tetap berfungsi dengan baik, sekaligus memastikan kinerjanya tetap normal. Dengan pemeliharaan yang tepat, potensi gangguan yang dapat menyebabkan kerusakan pada transformator

dapat diminimalkan. Selain itu, pemeliharaan juga berperan penting dalam menjamin kelangsungan penyaluran tenaga listrik.

Fungsi utama pemeliharaan meliputi:

1. Meningkatkan keandalan (*reliability*), ketersediaan (*availability*), dan efisiensi (*efficiency*) peralatan.
2. Memperpanjang umur operasional peralatan.
3. Mengurangi risiko kegagalan dan kerusakan pada peralatan.
4. Meningkatkan tingkat keamanan peralatan.
5. Meminimalkan waktu pemadaman akibat gangguan.

Program pemeliharaan transformator harus selaras dengan rencana pemeliharaan gardu distribusi. Secara spesifik, program pemeliharaan ini disusun berdasarkan jenis pemeliharaan yang diterapkan.

A. Pemeliharaan Rutin

Pemeliharaan ringan pada transformator dan instalasi gardu distribusi dilakukan setidaknya sekali dalam setahun untuk mencegah kerusakan. Kegiatan pemeliharaan ini mencakup:

1. Pembersihan fisik dari debu dan kotoran lainnya.
2. Pengukuran serta perbaikan kekencangan baut konektor penghantar.
3. Pengukuran dan perbaikan nilai pentahanan.
4. Pemeriksaan rating dan instalasi proteksi transformator distribusi.
5. Penyeimbangan beban.
6. Pengecatan dan perbaikan struktur gardu jika diperlukan.
7. Pemeriksaan adanya kebocoran pada transformator.

Pemeliharaan rutin sebaiknya dijadwalkan dengan mempertimbangkan hari-hari besar nasional atau kondisi khusus, seperti awal musim hujan.

B. Pemeliharaan Berdasarkan Kondisi (*Proactive Maintenance*)

Pemeliharaan rekondisi dilakukan berdasarkan hasil evaluasi pengukuran untuk memastikan transformator dapat dikembalikan ke performa maksimal. Kegiatan yang termasuk dalam pemeliharaan ini meliputi:

1. Penggantian seal bushing.

2. Penggantian isolator bushing.
3. Perbaikan konektor belitan dengan taping bushing.
4. Perbaikan tangki transformator.
5. Penggantian minyak transformator.
6. Perbaikan belitan transformator sesuai kebutuhan.

Setelah rekondisi, transformator harus menjalani proses commissioning ulang dan dipantau secara khusus saat dioperasikan.

C. Pemeliharaan Korektif Tidak Terencana

Pemeliharaan ini dilakukan sebagai respons terhadap gangguan atau berdasarkan hasil evaluasi yang merekomendasikan penggantian transformator baru.

Jumlah dan jenis pemeliharaan korektif tidak terencana harus diprediksi dengan baik untuk menghindari keterlambatan dalam pemulihan sistem saat terjadi kegagalan pada unit transformator distribusi atau perangkat switching/proteksi. Target jumlah pemeliharaan korektif yang direncanakan sebaiknya lebih kecil dari jumlah gangguan transformator pada tahun sebelumnya.

Dalam pelaksanaannya, pengujian off-line harus dilakukan jika terjadi gangguan yang berasal dari transformator maupun dari sumber lain. Gangguan ini dapat diidentifikasi dengan putusnya fuse TM pada transformator, CB pada penyulang, atau fuse TR akibat arus gangguan (Through Fault Current), guna memastikan apakah transformator masih dalam kondisi baik atau memerlukan rekondisi.

2. 2. 10. Standar Kriteria Sehat (*Health Index*) Trafo Distribusi

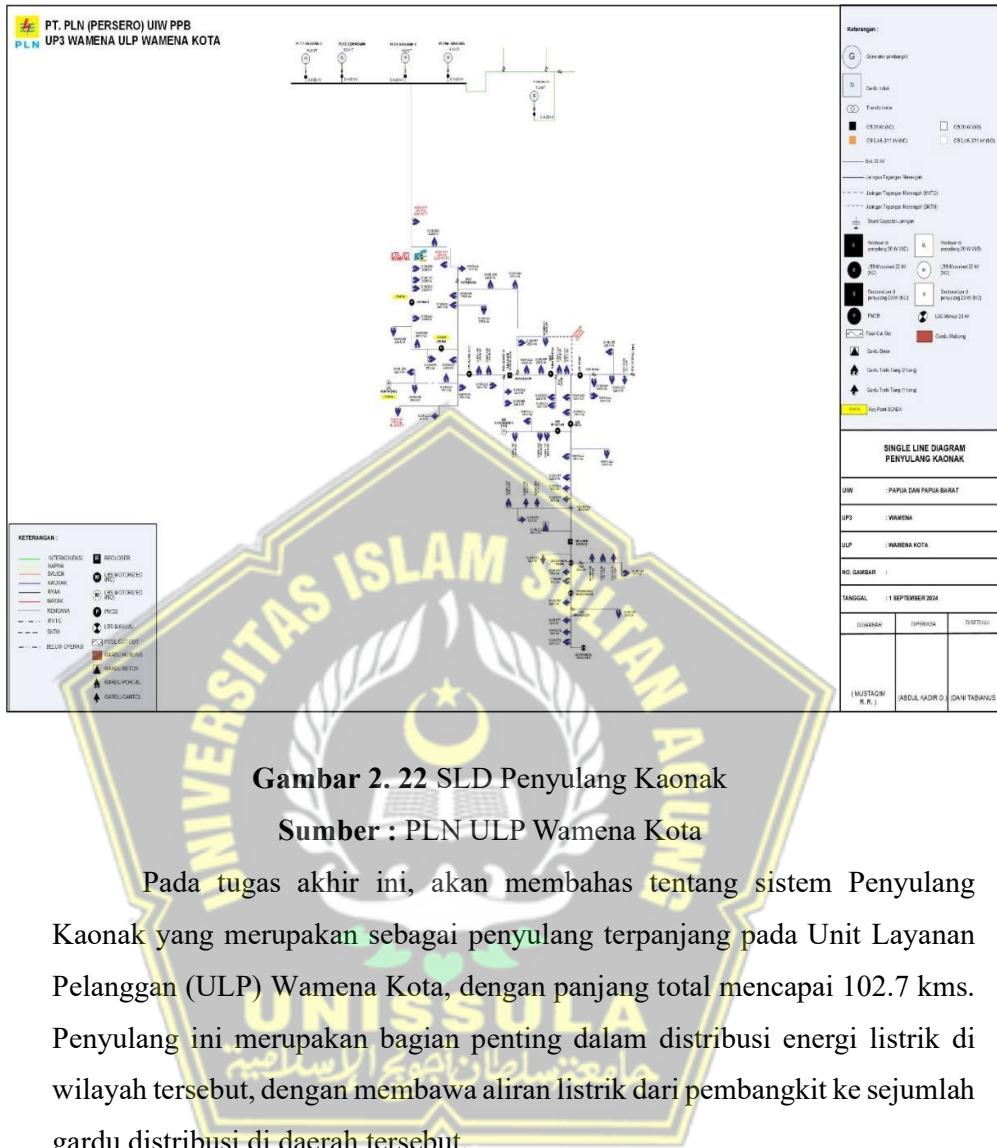
Dalam mencegah risiko kerusakan pada transformator diperlukan program pemeliharaan yang tepat dan efisien. Pemeliharaan ini harus didasarkan pada evaluasi hasil pengukuran serta perbandingan terhadap standar kriteria transformator yang masih dalam kondisi sehat (*Health Index*) pada sistem distribusi.

Tabel 2. 2 Health Index Trafo**Sumber :** (PT PLN (PERSERO), 2014)

No	Karakteristik	Health Index			
		Baik	Cukup	Kurang	Buruk
1	Kebocoran Minyak	Bersih	Packing Retak	Packing Retak / Berminyak	Rembes / Tetes
2	Kondisi Fisik Trafo	Mulus	Cacat Sirip Minor	Cacat Sirip Major	Bengkak
3	Pembumian Trafo	$< 1,7 \Omega$	$1,7 \Omega - < 5 \Omega$	$5 \Omega - < 10 \Omega$	$\geq 10 \Omega$
4	Kesesuaian Ampere Fuse TR	Sesuai Standar	Deviasi 1 tingkat di atas standar	Deviasi 2 tingkat diatas standar	Fuse TR Tidak ada (by pass)
5	Kondisi <i>Low Voltage Switch Board</i>	Boks bersih, instalasi rapi	Boks kotor, instalasi rapi	Boks karatan, instalasi rapi	Boks bocor, instalasi buruk
6	Pembebanan Arus TR (% thp KHA Outlet)	$< 60 \%$	$60 \% - < 80 \%$	$80 \% - < 100 \%$	$\geq 100 \%$
7	Ketidakseimbangan Arus Antar Fasa	$< 10 \%$	$10 \% - < 20 \%$	$20 \% - < 25 \%$	$\geq 25 \%$
8	Besar Arus Netral TR (% terhadap arus beban trafo)	$< 10 \%$	$10 \% - < 15 \%$	$15 \% - < 20 \%$	$\geq 20 \%$
9	Pembebanan Trafo (% terhadap Kapasitas)	$< 60 \%$	$60 \% - < 80 \%$	$80 \% - < 100 \%$	$\geq 100 \%$

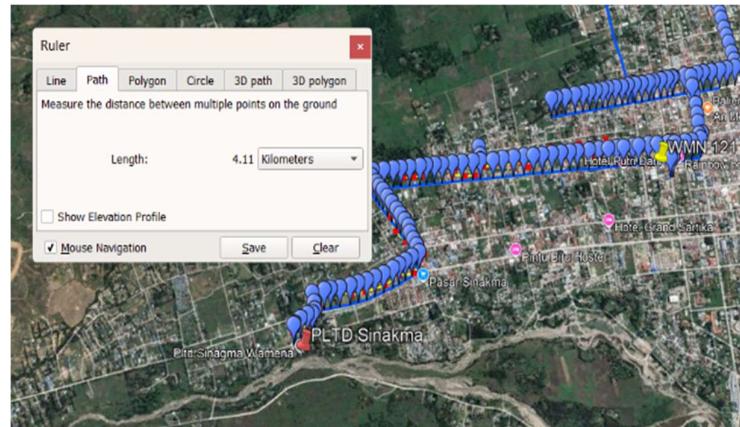
Mulai saat trafo baru terpasang / baru *energize*, sebaiknya suhu yang dihasilkan diukur dengan menggunakan alat *thermovision* pada saat beban maksimum atau setinggi – tingginya. setelah hasil pengukuran sudah didapatkan, perlu dilakukan suatu evaluasi apakah suhu yang terukur sebanding dengan beban yang dipikul transformator merujuk pada kapasitas daya terpasang. Hal yang perlu diperhatikan juga adalah mengenai *pointer record* yang menunjukkan nilai suhu maksimum yang pernah dialami sebagai indikator apakah trafo tersebut pernah *overload* atau tidak.

2. 2. 11. Gambaran Umum Kondisi Penyulang Kaonak



Di dalam konteks ini, terdapat dua gardu yang menjadi fokus pembahasan adalah:

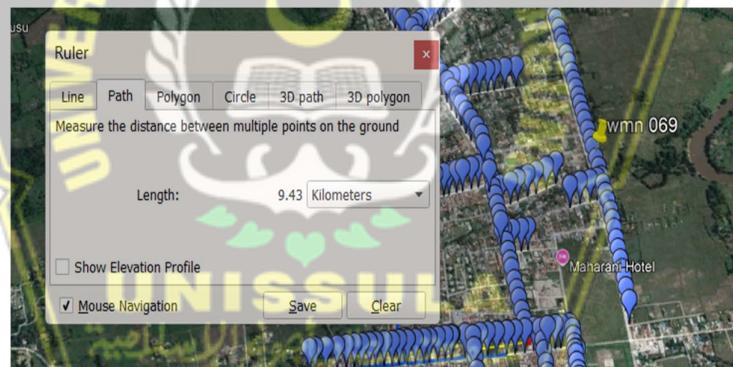
1. Gardu WMN 121 memiliki beban 84 % dari kapasitas trafo atau 74,7 kW, yang terletak sekitar 4,11 km dari pembangkit. Gardu ini merupakan titik distribusi yang menerima pasokan listrik dari penyulang Kaonak dan kemudian mendistribusikan listrik ke pelanggan di wilayah sekitar.



Gambar 2. 23 Jarak PLTD Sinakma dengan WMN 121

Sumber : PLN ULP Wamena Kota

2. Gardu WMN 069 pada tahun 2024 memiliki beban 95 % dari kapasitas trafo atau 85,5 kW, yang terletak sekitar 9,43 kms dari pembangkit. Gardu ini juga merupakan titik distribusi penting yang terhubung dengan penyulang Kaonak dan juga memberikan pasokan listrik ke pelanggan di wilayah tersebut.



Gambar 2. 24 Jarak PLTD Sinakma dengan WMN 069

Sumber : PLN ULP Wamena Kota

Pada kondisi yang ada nantinya untuk rencana penempatan trafo sisipan akan ditempatkan sesuai dengan perhitungan serta dengan pertimbangan jumlah beban atau pelanggan yang ada pada daerah tersebut.

2. 2. 12. ETAP

ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) adalah perangkat lunak berbasis grafis penuh yang berfungsi sebagai alat analisis untuk merancang dan menguji sistem secara offline melalui modul simulasi. Selain itu,

ETAP juga mendukung pemantauan data operasi secara real-time, simulasi sistem secara langsung, optimasi, manajemen energi sistem, serta simulasi pemutusan beban cerdas (*intelligent load shedding*). Untuk menjalankan simulasi aliran daya dan analisis hubung singkat, diperlukan beberapa data penting, di antaranya::

1. Data Transformator
2. Data kawat penghantar
3. Data Beban dan Data Bus
4. Data Tegangan JTM



BAB III

METODE PENELITIAN

3. 1. Objek Penelitian

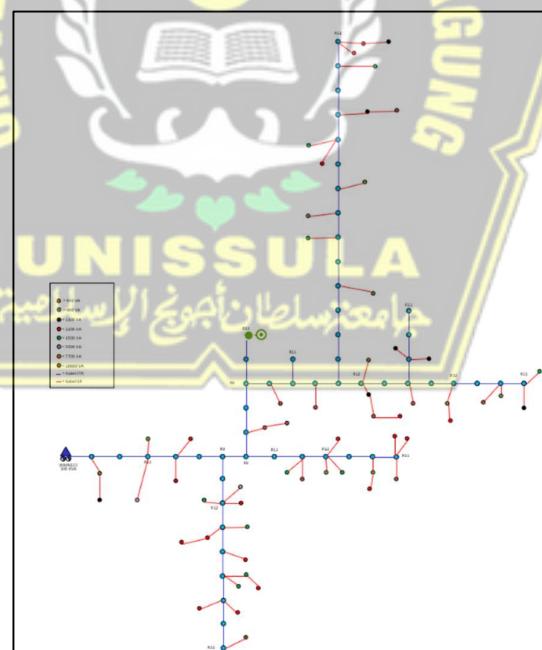
Objek penelitian adalah jaringan distribusi listrik pada Penyalurang Kaonak PT. PLN (Persero) ULP Wamena Kota, khususnya pada transformator WMN 121 dan WMN 069. Penelitian ini difokuskan pada analisis pembebanan transformator, jatuh tegangan, serta rencana pemasangan transformator sisipan untuk meningkatkan kualitas penyaluran energi listrik.

3. 2. Model Penelitian

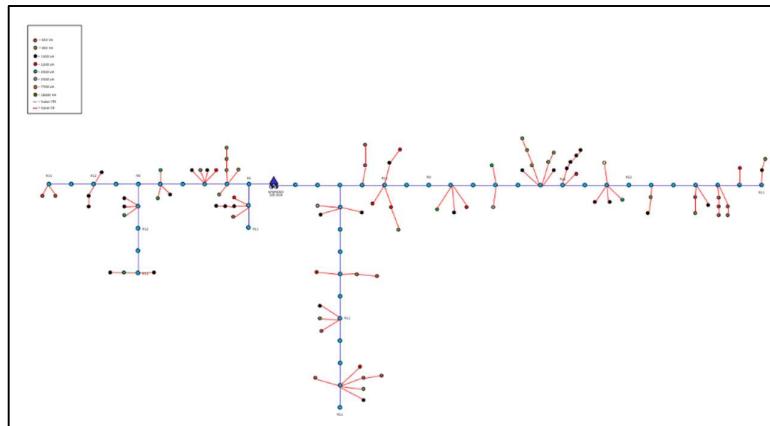
Model penelitian menggunakan pendekatan studi kasus dengan metode perhitungan rumus dan simulasi.

3. 2. 1 Model Kondisi *Eksisting* JTR WMN 121 & WMN 069

- Membuat pemodelan jaringan distribusi pada ETAP 12.6 berdasarkan data lapangan (SLD, Data Persebaran Pelanggan WMN 121 & WMN 069, data trafo, data penghantar, dan data beban).



Gambar 3. 1 Persebaran Pelanggan WMN 121



Gambar 3. 2. Persebaran Pelanggan WMN 069

- Melakukan analisis kondisi awal untuk mengetahui persentase pembebanan transformator serta *drop* tegangan pelanggan terjauh.

3. 2. 2 Model Peramalan Beban

Peramalan beban dilakukan menggunakan Metode *Least Square* berdasarkan data beban historis trafo WMN 121 dan WMN 069 pada periode 2022–2024.

Metode ini dipilih karena mampu menggambarkan tren kenaikan beban dari data historis sehingga dapat digunakan untuk memperkirakan beban di tahun-tahun mendatang.

- Rumus dasar metode Least Square:

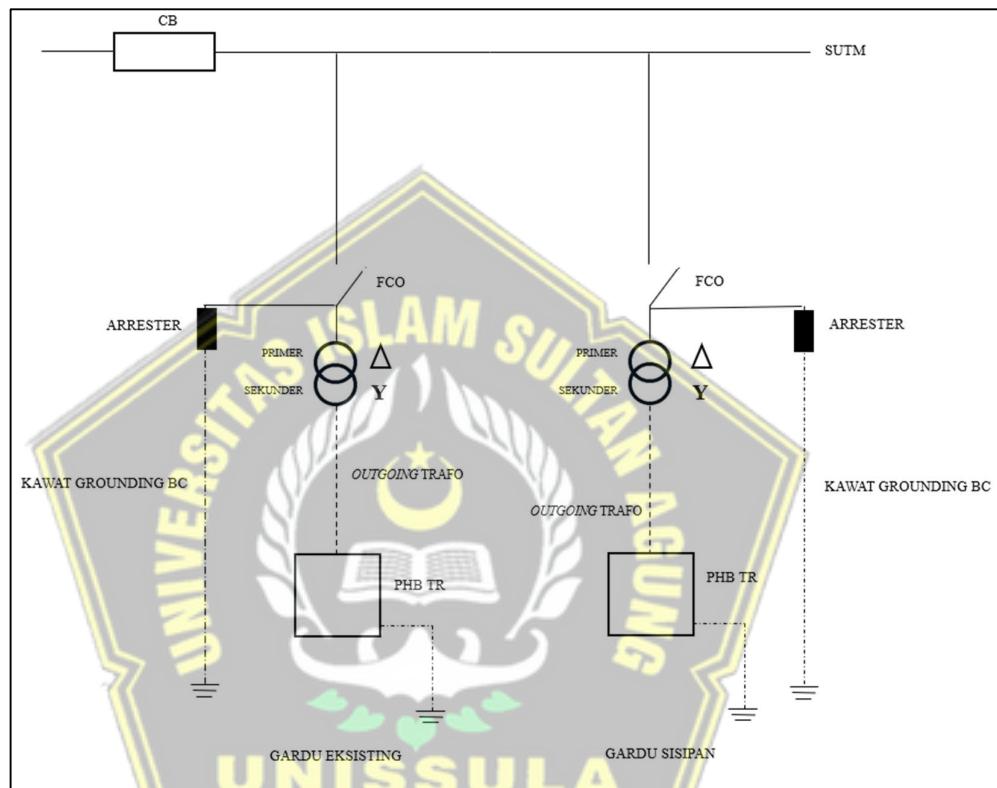
$$\begin{aligned}
 Y_n &= a + bx \\
 a &= \frac{\sum Y}{n} \\
 b &= \frac{\sum XY}{\sum X^2}
 \end{aligned}$$

3. 2. 3 Model Penentuan Perkiraan Lokasi Penempatan Transformator Sisip

- Penempatan transformator sisip dihitung menggunakan rumus estimasi jarak antara trafo eksisting dengan pelanggan terjauh. Rumus penempatan transformator sisip adalah sebagai berikut :

$$L = \frac{V_{VC} \times 10\%}{I_{BEBAN PUNCAK} \times R_{SALURAN}}$$

- Estimasi lokasi ditentukan agar tegangan ujung pelanggan berada dalam batas standar PLN dan distribusi beban antar trafo lebih seimbang.
- Berikut ini adalah SLD rencana koneksi penambahan transformator sisipan 3 fasa pada jaringan eksisting.



Gambar 3. 3 SLD Koneksi Penambahan Trafo Sisip

Pada Gambar 3.3 dapat diketahui bahwa kedua trafo mengambil suplai langsung dari JTM secara pararel pada sisi primer (*high voltage*) dan tidak paralel di sisi sekunder (*Low Voltage*). Dengan adanya penambahan transformator sisip ini maka:

- Beban pada trafo eksisting berkurang, karena sebagian pelanggan dipindahkan ke trafo sisipan.
- *Lifetime* trafo eksisting lebih panjang.
- Dapat menjaga keandalan panyaluran suplai listrik ke pelanggan.

3.2.4 Model Perhitungan *Drop* Tegangan

Analisis drop tegangan dihitung dengan persamaan:

$$\text{Drop voltage} = \frac{V_s - V_r}{V_s} \times 100\%$$

3.2.5 Model Perhitungan Pembebanan Transformator

Pembebanan transformator dihitung dengan rumus:

$$\text{Pembebanan trafo (\%)} = \frac{\text{I rata rata pengukuran}}{\text{I full load trafo}} \times 100\%$$

3.2.6 Model Simulasi ETAP 12.6

- Hasil perhitungan Peramalan beban dengan *Least Square*, *drop* tegangan, pembebanan, dan estimasi jarak lokasi trafo sisip, divalidasi melalui simulasi di ETAP 12.6 sehingga terbukti bahwa dapat mengatasi beban lebih dan *drop* tegangan pada WMN 121 dan WMN 069.
- Dilakukan skenario perbandingan antara kondisi eksisting dengan scenario setelah pemasangan trafo sisip.

3.2.7 Perencanaan Penentuan Aksesoris Gardu Distribusi

Perencanaan gardu sisip tidak hanya mencakup penentuan kapasitas dan lokasi trafo, tetapi juga penentuan aksesoris gardu sesuai standar konstruksi PLN. Aksesoris gardu yang direncanakan meliputi:

- Peralatan proteksi: fuse cut out (FCO), Arrester, NH Fuse, dan MCCB.
- Sistem pentanahan: batang pentanahan, kawat BC.
- Perlengkapan pendukung: tiang, PHB TR
- ❖ Pemilihan aksesoris didasarkan pada:
 - Standar PLN (SPLN, Buku PLN).
 - Hasil perhitungan.

Perencanaan ini memastikan gardu sisip yang dipasang aman, handal, dan sesuai dengan kebutuhan sistem distribusi.

3.3. Data Penelitian

Jenis data yang diambil untuk penelitian ini yaitu meliputi data-data sebagai berikut:

1. *Single line diagram* Penyulang Kaonak PT PLN (Persero) ULP Wamena Kota
2. Data pengukuran tegangan dan beban pada transformator WMN 121 dan WMN 069 di Penyulang Kaonak PT PLN (Persero) ULP Wamena Kota Tahun 2022 - 2024
3. Spesifikasi & kapasitas transformator WMN 121 dan 069
4. Pengukuran tegangan pelanggan terjauh dari transformator WMN 121 dan WMN 069
5. Data daya pelanggan
6. Gambar Persebaran Pelanggan WMN 121 dan WMN 069
7. Data Panjang Penghantar JTR dan jenis penghantar yang digunakan

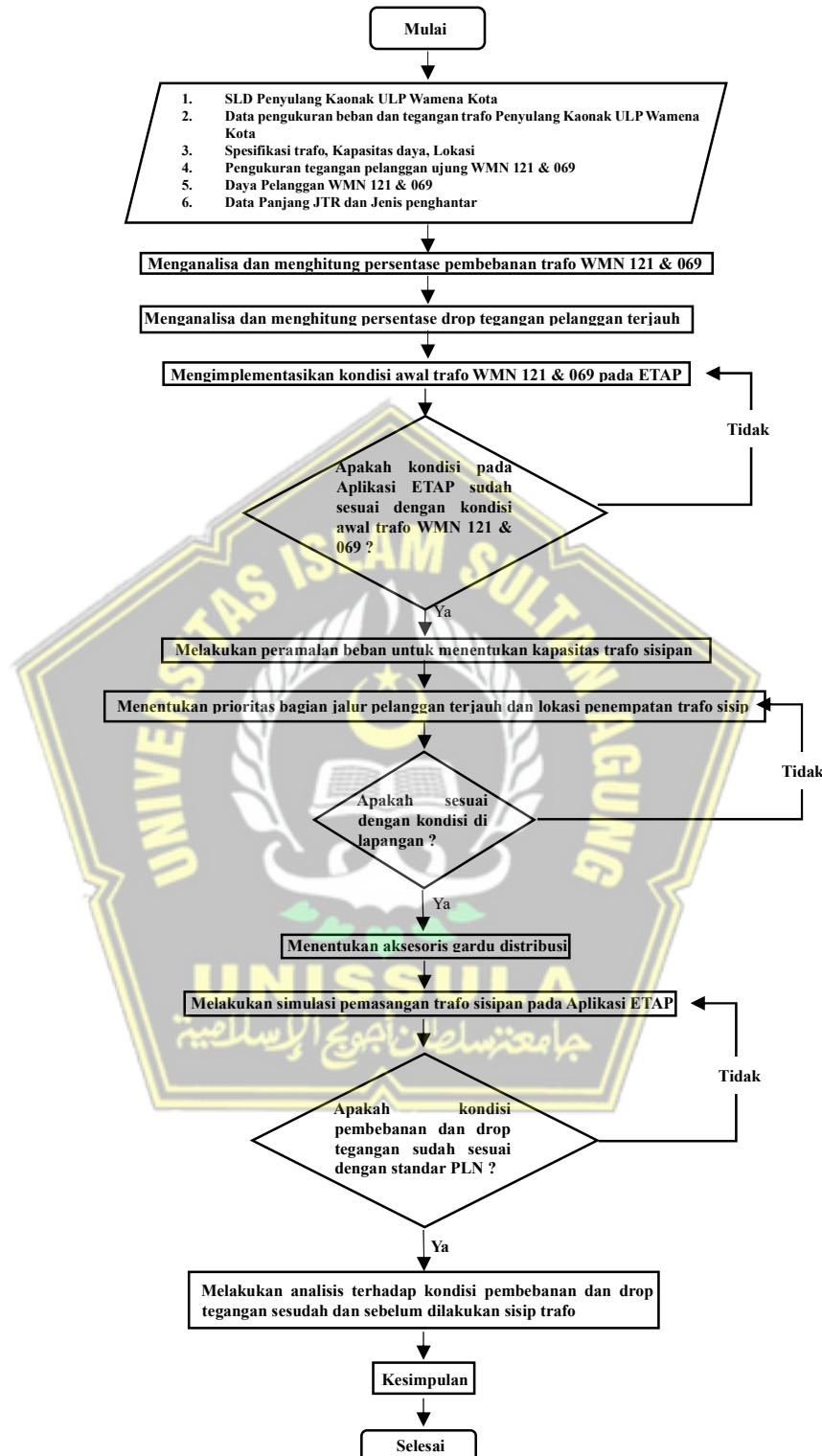
3.4. Alat Penelitian

Alat utama penelitian adalah *Software ETAP 12.6*, yang digunakan untuk:

- Memodelkan JTR WMN 121 dan WMN 069 sebelum maupun sesudah dilakukan transformator sisip.
- Melakukan simulasi aliran daya (*load flow analysis*).
- Menampilkan nilai tegangan dan pembebanan transformator sebelum dan sesudah dilakukan transformator sisip.

Selain software, penelitian juga didukung dengan alat ukur lapangan seperti *Digital Clamp Meter* dan peralatan survey lainnya untuk pengambilan data.

3.5. Langkah Penulisan Tugas Akhir



Gambar 3.4 Langkah Penulisan tugas akhir

Berikut adalah tahap-tahap yang dilakukan untuk menganalisis data yang telah diperoleh berupa diagram disertai penjelasannya.

Berikut adalah penjelasan dari diagram alir penelitian :

1. Penelitian terkait perencanaan pemasangan transformator sisipan ini dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu pengumpulan data, perhitungan, simulasi, serta analisis data. Proses pengumpulan data dilakukan di PT. PLN (Persero) ULP Wamena Kota dengan terlebih dahulu mengajukan izin pengambilan data.
2. Data yang akan digunakan pada penelitian ini seperti yang disebutkan pada sub bab 3.3.
3. Metode perhitungan digunakan untuk menentukan persentase beban dan besarnya penurunan tegangan pada transformator distribusi.
4. Menganalisa drop tegangan dilakukan untuk menentukan sebaiknya dilakukan pemasangan transformator sisipan, melakukan *uprating* transformator atau pecah beban JTR. Untuk memperbaiki nilai drop tegangan langkah yang paling efektif dari beberapa alasan seperti kapasitas transformator dan kondisi transformator sekitar adalah dilakukan penambahan transformator sisipan.
5. Memperkirakan lokasi transformator sisip menggunakan metode perhitungan. Apabila jarak penempatan trafo sisip sudah diketahui selanjutnya menggunakan simulasi Etap 12.6 untuk mengetahui nilai tegangan ujung dan pembebanan trafo eksisting apakah sudah sesuai atau belum.
6. Langkah selanjutnya menentukan material aksesoris apa saja yang akan digunakan berdasarkan standart konstruksi gardu yang ada.
7. Melakukan Analisa untuk mendapatkan perbandingan nilai pembebanan dan nilai tegangan ujung saat sebelum dan sesudah dilakukannya rencana pemasangan transformator sisipan.
8. Menentukan kesimpulan
9. Selesai

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Sebelum Pemasangan Transformator Sisipan

Penyulang Kaonak merupakan salah satu penyulang pada sistem kelistrikan ULP Wamena Kota, dimana Penyulang Kaonak memiliki panjang mencapai 102.7 kms dan penyulang ini mendapat suplai tegangan dari PLTD Sinakma. Pada Penyulang Kaonak terbagi menjadi 3 Zona dan 12 Section. Pengertian dari pembagian zona itu sendiri adalah pembagian wilayah yang dibatasi oleh Recloser. Berdasarkan hal tersebut, Zona 1 Penyulang Kaonak dimulai dari keluaran PLTD Sinakma sampai dengan Recloser Mulia Jaya. Zona 2 dimulai dari Recloser Mulia Jaya sampai dengan Recloser Kurulu, Sedangkan Zona 3 dimulai dari Recloser Kurulu sampai dengan ujung jaringan Penyulang Kaonak.

Section merupakan pembagian wilayah jaringan tegangan menengah berdasarkan letak dari LBS Motorized maupun LBS Manual. Pada Penyulang Kaonak Section 1 adalah LBS SMAN 1, section 2 adalah LBS BNI, section 3 adalah LBS Gang Suci, section 4 adalah Recloser Mulia Jaya, section 5 adalah LBS Bina Marga, section 6 adalah LBS Moai, section 7 adalah LBS Pikhe, section 8 adalah LBS JB Wenas, section 9 adalah Recloser Kurulu, section 10 adalah LBS Waga-waga, section 11 adalah LBS Wosi, section 12 adalah LBS Koragi

Penyulang Kaonak memiliki 1 Pelanggan tegangan menengah dengan daya 240 kVa dan 78 gardu distribusi pasang luar dan 1 gardu distribusi pasang dalam

NO	NAMA PENYULANG	SISTEM	JAM NYALA	SUTM (kms)	Total JTM (kms)	GARDU DISTRIBUSI	
						PLN	NON PLN
1	Nayak	WAMENA	24	108,40	108	50	3
2	Kaonak	WAMENA	24	102,70	103	75	4
3	Napua	WAMENA	24	79,28	79	67	0
4	Baliem	WAMENA	24	2,76	3	8	2
5	Byak	WAMENA	24	4,05	4	2	4
6	Interkoneksi	WAMENA	24	9,30	9	6	0

Tabel 4. 1 Jumlah Trafo Per Penyulang ULP Wamena Kota

NO	NOGARDU	ALAMAT	DAYA	PROSEN
1	WMN 151	Jl. Lokasi 3 Lap.Sinaput	100	79.69
2	WMN 152	JI.SMU Kristen Muai	100	70.86
3	WMN020	JL HOM-HOM - GD BULOG	50	72.39
4	WMN025	JL. THAMRIN SAMPING BPJS	160	71.92
5	WMN069	JL. JB. WENAS	100	94.9
6	WMN080	JL SUDIRMAN	100	77.81
7	WMN087	DEPAN KTR KEHUTANAN WAMENA JL.SD PERCOBAAN	160	77.68
8	WMN121	JL. IRIAN ATAS WAMENA SISIPAN	100	84.7
9	WMN194	JL JENDRAL SUDIRMAN DEPAN GEREJA MARANATA	100	111.53

Tabel 4. 2 Daftar Gardu *overload* Penyulang Kaonak

Ditinjau berdasarkan Tabel 4.1 diketahui bahwa Penyulang Kaonak memiliki jumlah trafo sebanyak 79 buah. Berdasarkan SE DIR 0017.E/2014 dijelaskan bahwa trafo yang sudah memiliki beban lebih dari 80% dari kapasitasnya dikategorikan sebagai trafo *overload*.

Berdasarkan pada standar tersebut, pada Penyulang Kaonak saat ini memiliki 3 buah trafo yang mengalami beban lebih atau *overload*. Untuk mengatasi masalah ini, maka dapat dilakukan dengan beberapa metode antara lain adalah *uprating* trafo, melakukan pecah beban JTR, dan penambahan trafo sisip. Pada kondisi di ULP Wamena Kota, melakukan penambahan trafo sisip merupakan metode yang paling sesuai dikarenakan jarak antar gardu pasang luar yang lain masih cukup jauh dan juga stok material trafo diatas 100 kVA sangat terbatas.

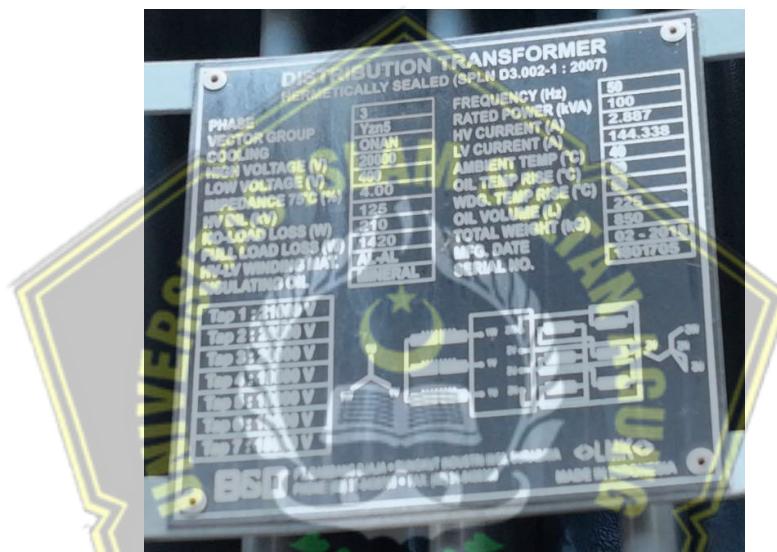
Pada laporan pelanggan ULP Wamena Kota terdapat kejadian tegangan drop pada pelanggan gardu WMN 121 yang mencapai 190 V dan pada pelanggan gardu WMN 069 tegangan pelanggan ujung mencapai 192 V

Berdasarkan kondisi beban lebih dan jatuh tegangan yang terjadi maka pada Penyulang Kaonak tepatnya pada gardu WMN 121 dan WMN 069 akan

dilakukan penambahan trafo sisip dan selanjutnya akan dilaksanakan analisis terhadap pemasangan trafo sisip tersebut.

4.1.1 Gardu Distribusi Pasang Luar WMN 121

Gardu distribusi pasang luar WMN 121 merupakan gardu distribusi dengan kapasitas daya terpasang sebesar 100 kVA yang berada di Jl Irian, Kelurahan Wamena Kota, Kabupaten Jayawijaya. Transformator terpasang merupakan jenis *step down* yaitu berfungsi untuk menurunkan tegangan dari tegangan jaringan menengah 20/11 kV menjadi tegangan rendah 400/230 V.



Gambar 4. 1 Nameplate Trafo WMN 121

Berdasarkan gambar diatas, gardu distribusi pasang luar WMN 121 termasuk ke dalam kategori gardu distribusi yang digunakan untuk pelanggan umum. Pengertian dari gardu distribusi untuk pelanggan umum disini adalah gardu yang peruntukannya ditujukan untuk lebih dari satu pelanggan. Transformator pada gardu distribusi WMN 121 menggunakan merk B & D yang dibuat pada tahun 2018 dan memiliki hubungan belitan Yzn5. Pada gardu distribusi WMN 121 memiliki beberapa pengaman antara lain pengaman pada jaingan tengah berupa *fuse cut out* (FCO), pengaman terhadap surja petir yaitu Arrester, serta pengaman jurusan berupa NH/NT fuse.

Berdasarkan dari konstruksinya, gardu WMN 121 menggunakan konstruksi gardu pasang luar dengan menggunakan 2 tiang besi atau apabila berdasarkan Buku Standar Konstruksi Distribusi PLN Wilayah Papua dan Papua Barat Tahun 2018 konstruksi ini bisa disebut sebagai konstruksi M-21 (konstruksi trafo portal 3 phasa pada pertengahan). Konstruksi M-21 mampu menahan beban transformator lebih dari 1000 kg. sehingga berdasarkan hal tersebut konstruksi pada gardu WMN 121 telah sesuai berdasarkan buku standar konstruksi, dimana pada gardu tersebut terpasang transformator 100 kVa atau seberat 850 kg.

Pada gardu distribusi pasang luar WMN 121 memiliki 1 jurusan dengan jarak pelanggan terjauh dari gardu dengan jarak mencapai 1.12 kms dengan jenis penghantar JTR yang dipakai adalah Twisted Cable NFA2X 3x70 + 70 mm².

4.1.1.1 Kondisi Pembebanan Transformator WMN 121

Gardu distribusi WMN 121 paling banyak mensuplai pelanggan tegangan rendah 1 phasa. Karakteristik pelanggan gardu tersebut mulai dari pelanggan rumah tangga, pelanggan perkantoran, pelanggan bisnis, dan pelanggan social. Berdasarkan data variasi serta banyaknya pelanggan maka dilakukan pengukuran beban dan tegangan pada waktu beban puncak (WBP) maupun di luar waktu beban puncak (LWBP).

No	Tanggal Ukur	I-rms (A)				Tegangan fasa-netral		
		R	S	T	N	R - N	S - N	T - N
1	04/06/2024 - 17:50	92,5	142,7	131,9	84,4	226	228	224
2	04/06/2024 - 10:23	70,9	104,7	102,6	59,6	225	228	224
3	29/11/2023 - 10:35	63	82	102,1	53,25	221	222	220
4	29/11/2023 - 17:48	95,2	108,2	135,5	73,8	220	222	220
5	10/08/2023 - 20:08	144,8	58,1	119,8	95,2	222	226	226
6	08/06/2023 - 09.18	101	69,2	111,6	48,74	220	224	222
7	03/03/2022 - 19.03	70	125	102	86	224	225	224

Tabel 4. 3 Hasil Pengukuran WMN 121

Berdasarkan tabel hasil pengukuran gardu WMN 121, telah dilakukan pengukuran beban dan tegangan pada waktu beban puncak (WBP) yaitu mulai pukul 17.30 – 20.00 WIT. Data pengukuran diambil dalam kurun waktu 3 tahun terakhir yaitu pada tahun 2022 sampai 2024.

Berdasarkan hasil pengukuran yang telah diperoleh, dapat diketahui bahwa beban transformator pada tahun 2022 sebesar 69 % , tahun 2023 sebesar 78 % dan pada tahun 2024 sebesar 84,7 %. Berikut ini merupakan contoh perhitungan pembebahan trafo pada tahun 2024 :

$$\begin{aligned}
 \text{Arus rata-rata WMN 121} &= \frac{92,5+142,7+131,9}{3} \\
 &= 122,36 \text{ A} \\
 \text{Arus full load trafo 100 kVA} &= \frac{100000}{400 \times 1,73} \\
 &= 144,5 \text{ A} \\
 \text{Persentase trafo WMN 121} &= \frac{122,36}{144,5} \times 100\% \\
 &= 84,7 \%
 \end{aligned}$$

Sesuai dengan SE DIR PT. PLN (Persero) NO 17 tahun 2014, dapat dikatakan bahwa pembebahan transformator WMN 121 pada tahun 2024 berada dalam posisi kurang.

4.1.1.2 Kondisi Drop Tegangan Pelanggan Terjauh Gardu WMN 121

Pada laporan pelanggan ULP Wamena kota diketahui terdapat laporan terjadi drop tegangan pada pelanggan terjauh transformator WMN 121. Jarak pelanggan pada gardu ini adalah sejauh 1.12 Kms. Pengantar yang digunakan adalah *twisted cable* NFA2X 3 x 70 + 70 mm². Untuk mengetahui berapa jatuh tegangan yang terjadi, maka dilakukan pengukuran tegangan di pelanggan terjauh dari transformator gardu WMN 121.

Berdasarkan pengukuran tegangan pada kWh meter pelanggan terjauh didapat hasil pada saat beban puncak (WBP) nilai dari tegangan sebesar 190 V. Sebelum dilaksanakan pengecekan tegangan, terlebih dahulu telah dilakukan inspeksi pada kabel jaringan tegangan rendah dan juga kondisi pada transformator WMN 121. Hasil inspeksi tersebut menunjukkan hasil yang baik melalui inspeksi tier 1 maupun tier 2.

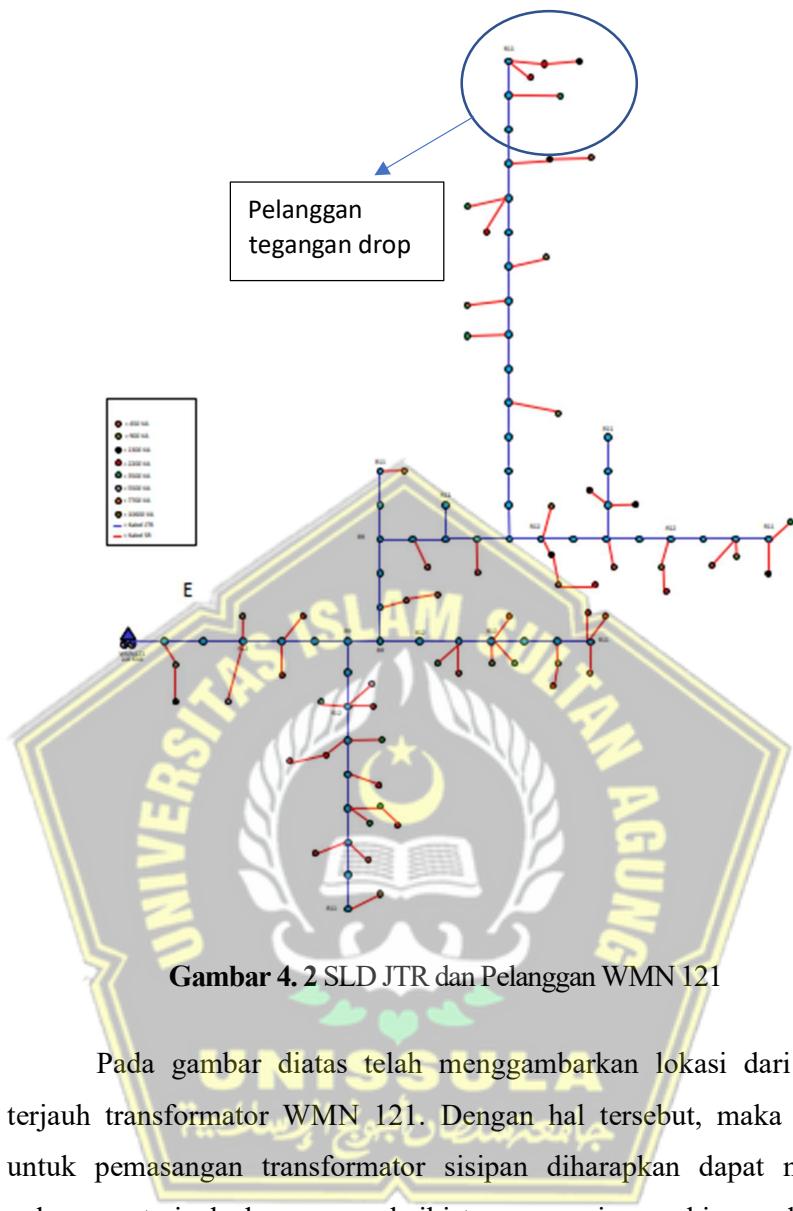
No Gardu	Waktu Ukur	Tegangan Panel			Tegangan Ujung	Percentase Drop Tegangan
		R-N	S-N	T-N		
WMN 121	WBP	226	228	224	190	16,6 %

Tabel 4. 4 Hasil Pengukuran Tegangan WMN 121

Berdasarkan dengan standar yang telah ditetapkan oleh PLN yaitu pada SPLN 1 tahun 1995, dimana jatuh tegangan hanya memiliki batas toleransi maksimal – 10 % dari tegangan pelayanan 220/380. Mengacu pada standar tersebut dengan mayoritas pelanggan pada gardu WMN 121 adalah pelanggan rumah tangga maka batas bawah jatuh tegangan adalah maksimal di 198 V. Sehingga pada pelanggan terjauh pada gardu WMN 121 telah melampaui batas bawah toleransi tegangan pelayanan yang telah ditetapkan oleh PLN karena jatuh tegangan yang terjadi telah mencapai 16,6 %

$$\begin{aligned}
 \text{Jatuh Tegangan} &= \frac{Vs - Vr}{Vs} \times 100 \% \\
 &= \frac{228 - 190}{228} \times 100 \% \\
 &= 16,6 \%
 \end{aligned}$$

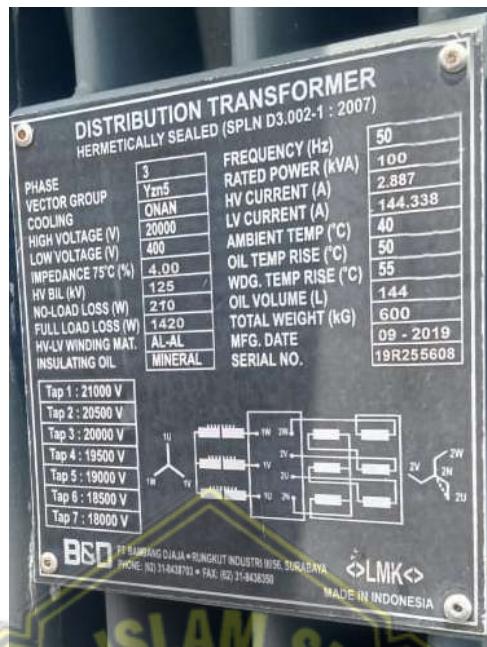




Pada gambar diatas telah menggambarkan lokasi dari pelanggan terjauh transformator WMN 121. Dengan hal tersebut, maka diharapkan untuk pemasangan transformator sisipan diharapkan dapat menjangkau pelanggan terjauh dan memperbaiki tegangan ujung sehingga dapat sesuai dengan standar yang ditetapkan PLN.

4.1.2 Gardu Distribusi Pasang Luar WMN 069

Gardu distribusi pasang luar WMN 069 merupakan gardu distribusi dengan kapasitas daya terpasang sebesar 100 kVA yang berada di Jl JB Wenas, Kelurahan Sinapuk, Kabupaten Jayawijaya. Transformator terpasang merupakan jenis *step down* yaitu berfungsi untuk menurunkan tegangan dari tegangan jaringan menengah 20/11 kV menjadi tegangan rendah 400/230 V.



Gambar 4.3 Nameplate Transformator WMN 069

Berdasarkan tabel diatas, gardu distribusi pasang luar WMN 069 termasuk ke dalam kategori gardu distribusi yang digunakan untuk pelanggan umum. Pengertian dari gardu distribusi untuk pelanggan umum disini adalah gardu yang peruntukannya ditujukan untuk lebih dari satu pelanggan. Transformator pada gardu distribusi WMN 069 menggunakan merk B&D yang dibuat pada tahun 2019 dan memiliki hubungan Yzn5 Pada gardu distribusi WMN 069 memiliki beberapa pengaman antara lain pengaman pada jaringan tengah berupa *fuse cut out* (FCO), pengaman terhadap surja petir yaitu Arrester, serta pengaman jurusan berupa NH/NT fuse.

Berdasarkan dari konstruksinya, gardu WMN 069 menggunakan konstruksi gardu pasang luar dengan menggunakan 2 tiang besi atau apabila berdasarkan Buku Standar Konstruksi Distribusi PLN Wilayah Papua dan Papua Barat Tahun 2018 konstruksi ini bisa disebut sebagai konstruksi M-21 (konstruksi trafo portal 3 phasa pada pertengahan). Konstruksi M-21 mampu menahan beban transformator lebih dari 1000 kg. sehingga berdasarkan hal tersebut konstruksi pada gardu WMN 069 telah sesuai berdasarkan buku standar konstruksi, dimana pada gardu tersebut terpasang transformator 100 kVA atau seberat 600 kg.

Pada gardu distribusi pasang luar WMN 069 memiliki 2 jurusan dengan jarak pelanggan terjauh dari gardu dengan jarak mencapai 1,1 Kms dengan jenis penghantar JTR yang dipakai adalah Twisted Cable NFA2X 3 x $70 + 70 \text{ mm}^2$.

4.1.2.1 Kondisi Pembebanan Transformator WMN 069

Gardu distribusi WMN 069 paling banyak mensuplai pelanggan tegangan rendah 1 phasa. Karakteristik pelanggan gardu tersebut mulai dari pelanggan rumah tangga, dan pelanggan sosial. Berdasarkan data variasi serta banyaknya pelanggan maka dilakukan pengukuran beban dan tegangan pada waktu beban puncak (WBP) maupun di luar waktu beban puncak (LWBP).

No	Tanggal Ukur	I-rms (A)				Tegangan fasa-netral		
		R	S	T	N	R - N	S - N	T - N
1	31/08/2024 - 17:54	129,2	137	145	70,6	217	223	220
2	30/08/2024 - 11:15	86,6	131,3	112,9	65,7	224	224	220
3	18/12/2023 - 18:03	117,2	124,3	126,4	39,88	220	222	219
4	13/06/2023 - 11:27	86,1	134,2	128,8	54,24	223	224	221
5	30/09/2022 - 19:37	124	108	119	76	221	219	219
6	30/09/2022 - 11:37	113,9	86,5	110,3	53,35	223	221	222

Tabel 4. 5 Hasil Pengukuran WBP WMN 069

Berdasarkan tabel hasil pengukuran gardu WMN 069, telah dilakukan pengukuran beban dan tegangan pada waktu beban puncak (WBP) yaitu mulai pukul 18.00 – 20.00 WIT. Data pengukuran diambil dalam kurun waktu 3 tahun terakhir yaitu pada tahun 2022 sampai 2024. Berdasarkan hasil pengukuran yang telah diperoleh, dapat diketahui bahwa beban transformator pada tahun 2022 sebesar 72 %, tahun 2023 sebesar 85 % dan pada tahun 2024 sebesar 95 %. Berikut ini merupakan contoh perhitungan pembebanan trafo pada tahun 2024.

$$\begin{aligned}
 \text{Arus rata-rata WMN 069} &= \frac{129,2+137+145,4}{3} \\
 &= 137,2 \\
 \text{Arus Full load trafo } 100 \text{ kVA} &= \frac{100000}{400 \times 1,73}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 144,5 \text{ A} \\
 \text{Percentase trafo WMN 069} &= \frac{137,2}{144,5} \times 100\% \\
 &= 94,9 \%
 \end{aligned}$$

Sesuai dengan SE DIR PT. PLN (Persero) NO 17 tahun 2014, dapat dikatakan bahwa pembebanan transformator WMN 069 dalam 2 tahun terakhir berada pada posisi kurang.

4.1.2.2 Kondisi Drop Tegangan Pelanggan Terjauh gardu WMN 069

Pada laporan pelanggan ULP Wamena kota diketahui terdapat laporan terjadi drop tegangan pada pelanggan terjauh transformator WMN 069. Jarak pelanggan pada gardu ini adalah sejauh kurang lebih 1,05 Kms. Penghantar yang digunakan adalah *twisted cable* NFA2X 3 x 70 + 70 mm². Untuk mengetahui berapa jatuh tegangan yang terjadi, maka dilakukan pengukuran tegangan di pelanggan terjauh dari transformator gardu WMN 069.

Berdasarkan pengukuran tegangan pada kWh meter pelanggan terjauh didapat hasil pada saat beban puncak (WBP) nilai dari tegangan sebesar 192 V. Sebelum dilaksanakan pengecekan tegangan, terlebih dahulu telah dilakukan inspeksi pada kabel jaringan tegangan rendah dan juga kondisi pada transformator WMN 069. Hasil inspeksi tersebut menunjukkan hasil yang baik melalui inspeksi tier 1 maupun tier 2.

No Gardu	Waktu Ukur	Tegangan Panel			Tegangan Ujung	Percentase Drop Tegangan
		R-N	S-N	T-N		
WMN 069	WBP	217	223	220	192,4	13,9 %

Tabel 4. 6 Tabel Jatuh Tegangan WMN 069

Berdasarkan dengan standar yang telah ditetapkan oleh PLN yaitu pada SPLN 1 tahun 1995, dimana jatuh tegangan hanya memiliki batas toleransi maksimal – 10 % dari tegangan pelayanan 220/380. Mengacu pada standar tersebut dengan mayoritas pelanggan pada gardu WMN 069 adalah pelanggan rumah tangga maka batas bawah jatuh tegangan adalah maksimal di 198 V. Sehingga pada pelanggan terjauh pada gardu WMN 069 telah melampaui batas bawah toleransi tegangan pelayanan yang telah ditetapkan oleh PLN karena jatuh tegangan yang terjadi telah mencapai 14 %

$$\begin{aligned}\text{Jatuh Tegangan} &= \frac{Vs - Vr}{Vs} \times 100 \% \\ &= \frac{223 - 192,4}{223} \times 100 \% \\ &= 13,7 \%\end{aligned}$$

4.2 Perencanaan Pemasangan Transformator Sisipan WMN 121 dan WMN 069

Pemasangan transformator sisipan ini bertujuan untuk mengatasi permasalahan beban lebih dan penurunan tegangan pada pelanggan ujung. Dalam penentuan letak transformator sisipan diperlukan suatu simulasi menggunakan aplikasi ETAP 12.6 untuk mengimplementasikan kondisi awal pada transformator WMN 121 dan WMN 069 pada waktu beban puncak (WBP). Dalam simulasi ini nantinya didapatkan kondisi beban lebih dan penurunan tegangan yang sesuai dengan data yang diperoleh yang selanjutnya dilakukan simulasi untuk pemasangan transformator sisipan.

Tahapan perencanaan ini membutuhkan suatu metode peramalan beban untuk mengetahui kapasitas trafo yang akan digunakan pada transformator sisipan. Pertimbangan pembagian jalur beban sangat penting untuk mengatasi penurunan tegangan, terutama untuk pelanggan yang berada diujung jaringan.

4.2.1 Transformator WMN 121

Pada tanggal 4 Juni 2024 saat waktu beban puncak (WBP), telah dilakukan pengukuran beban pada gardu distribusi WMN 121 dengan persentase pembebanan mencapai 85 % dari daya terpasang transformator. Gardu distribusi WMN 121 melayani kurang lebih 59 pelanggan dan

memiliki jarak dengan pelanggan terjauh sepanjang 1,12 kms. Menurut SE DIR PT PLN (Persero) NO 017 Tahun 2014 dapat disimpulkan bahwa transformator pada gardu WMN 121 mengalami beban berlebih (*overload*) dan pengukuran tegangan pada kWh meter pelanggan terjauh didapatkan hasil 190 V

4.2.1.1 Simulasi Kondisi Awal Transformator WMN 121 ETAP 12.6

Pada perencanaan pemasangan transformator sisipan ini memerlukan aplikasi ETAP 12.6 sebagai penunjang untuk simulai kondisi pembebanan dan jatuh tegangan pada transformator WMN 121. Data yang digunakan pada simulasi merupakan data yang bersumber dari PLN ULP Wamena Kota berupa data pengukuran waktu beban puncak (WBP) tahun 2024.



Gambar 4.4 Hasil Simulasi Kondisi Awal Pembebanan Transformator WMN 121

Pada Gambar 4.4 menunjukkan hasil simulasi pembebanan transformator WMN 121 mencapai 83 %. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi yang telah dilakukan sudah sangat mendekati dengan hasil pengukuran yang dilakukan yaitu mencapai 84,7 %. Sehingga, simulasi ETAP 12.6 ini dapat digunakan untuk merencanakan transformator sisipan WMN 121.

4.2.1.2 Peramalan Beban

Berdasarkan SE DIR PT PLN (Persero) No 17 Tahun 2014, nilai pembebangan transformator yang diizinkan adalah sebesar 80 % dari kapasitas transformator. Berdasarkan standar tersebut maka transformator WMN 121 telah mengalami beban lebih. Adapun nilai beban lebih dari transformator tersebut dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\text{Persentase Beban Lebih} &= \% \text{ Beban saat ini} - \% \text{ Beban Health Index} \\ &= 85 \% - 80 \% \\ &= 5 \%\end{aligned}$$

Sehingga berdasarkan perhitungan diatas, maka dapat dihitung kapasitas transformator yang diperlukan untuk transformator sisip.

$$\begin{aligned}\text{Beban} &= \frac{\text{kelebihan beban} (\%)}{100\%} \times \text{kapasitas trafo terpasang} \\ &= \frac{5 \%}{100\%} \times 100 \text{ kVA} \\ &= 5 \text{ kVA}\end{aligned}$$

Maka, nilai kapasitas minimal transformator sisip yang diperlukan adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\text{Kapasitas minimal} &= \frac{\text{Beban}}{0,8} \text{ kVA} \\ &= \frac{5}{0,8} \text{ kVA} \\ &= 6,25 \text{ kVA}\end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan yang sudah dilakukan, maka minimal kapasitas transformator terpasang untuk sisipan WMN 121 adalah sebesar 6,25 kVA dan beban yang dapat dialihkan dari transformator WMN 121 ke sisipan adalah sebesar 5 kVA. Akan tetapi, dalam penentuan kapasitas transformator harus mempertimbangkan jumlah kenaikan beban di setiap tahunnya.

Dalam penentuan kenaikan jumlah beban setiap tahun, maka digunakan metode peramalan beban dengan metode *Least Square*. Adapun perhitungan peramalan beban pada transformator WMN 121 adalah sebagai berikut :

Tahun	2022	2023	2024
Beban Puncak (kVA)	68	78	85
Beban Puncak (%)	68	78	85

Tabel 4. 7 Pembebanan WMN 121 dalam 3 Tahun Terakhir

No	Tahun	Beban Puncak (kVA)	X	XY	X ²
1	2022	68	-1	-68	1
2	2023	78	0	0	0
3	2024	85	1	85	1
n = 3		$\sum Y = 231$	0	$\sum XY = 17$	$\sum X^2 = 2$

Tabel 4. 8 Parameter Metode *Least Square*

1. Menghitung nilai a dan b

$$a = \frac{\sum Y}{n} = \frac{231}{3} = 77$$

$$b = \frac{\sum XY}{\sum X^2} = \frac{17}{2} = 8,5$$

2. Membuat persamaan *Least Square*

$$Y_n = a + bx = 77 + 8,5x$$

3. Hasil nilai Yn pada tahun 2025, dengan nilai x=2

$$Y_n = a + bx$$

$$Y_n = 77 + 8,5x$$

$$Y_n = 94$$

4. Persentase beban pada tahun 2025

$$\text{Persentase Beban (\%)} = \frac{Y_n}{\text{Kapasitas Transformator}} \times 100\%$$

$$\text{Persentase Beban (\%)} = \frac{94 \text{ kVA}}{100 \text{ kVA}} \times 100\%$$

$$\text{Persentase Beban (\%)} = 94 \%$$

5. Persentase pertumbuhan beban

$$\text{Pertumbuhan beban (\%)} = \frac{\% \text{Beban 2025} - \% \text{Beban 2024}}{\% \text{Beban 2024}} \times 100\%$$

$$\text{Pertumbuhan beban (\%)} = \frac{94 \% - 85 \%}{85 \%} \times 100\%$$

$$\text{Pertumbuhan beban (\%)} = 9 \%$$

Apabila Transformator sisipan gardu WMN 121 menggunakan transformator 100 kVA, maka asumsi pembebanan dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\text{Beban asumsi (\%)} = \frac{94}{100 \text{ kVA} + 100 \text{ kVA}} \times 100\%$$

$$\text{Beban asumsi (\%)} = 47 \% \text{ (tahun 2025)}$$

$$\text{Beban teralihkan (\%)} = 94 \% - 47 \%$$

$$\text{Beban teralihkan (\%)} = 47 \%$$



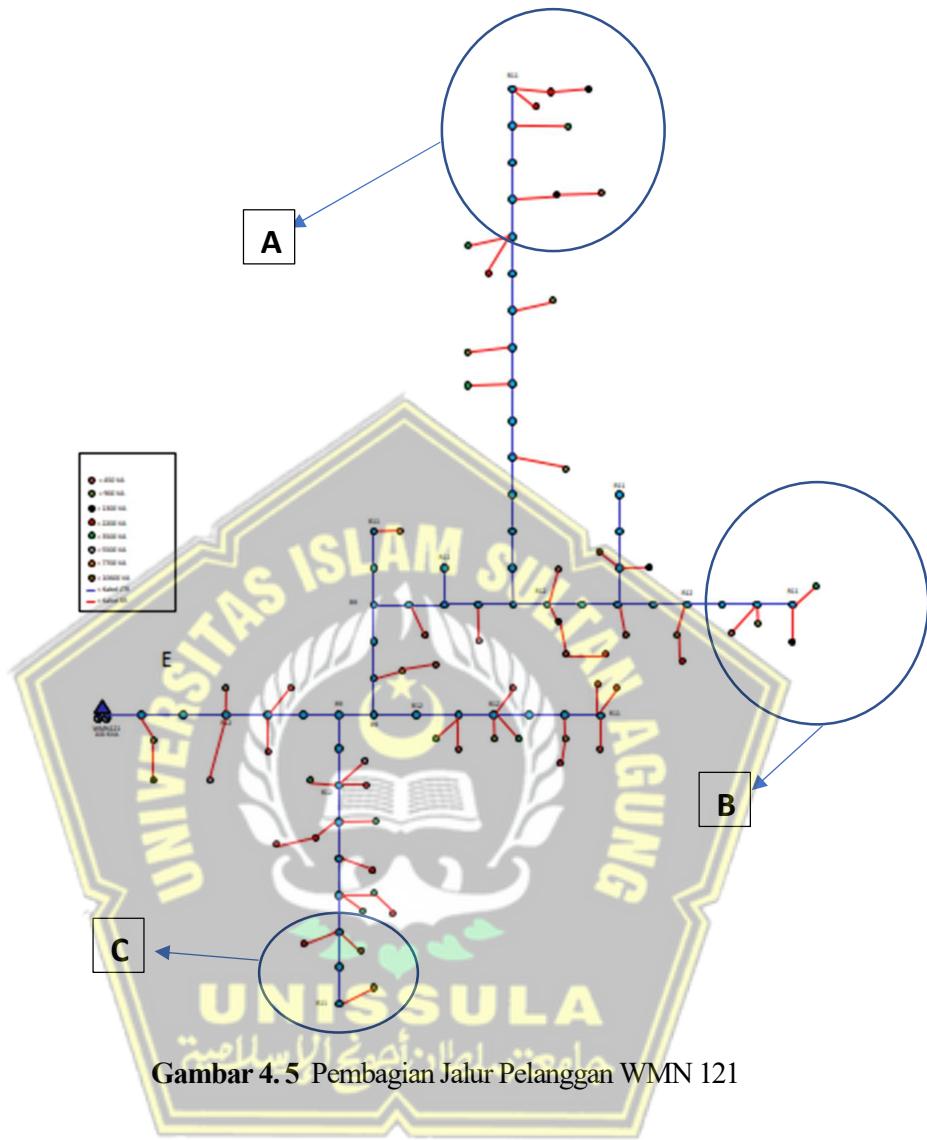
4.2.1.3 Pemilihan Kapasitas Transformator Sisipan WMN 121

Kapasitas Trafo Sisipan	X	Tahun	Perkiraan Beban (kVA)	Pertumbuhan Beban (%)	Pembebanan WMN 121		Pembebanan Trafo Sisip (%)
					Sebelum Sisip	Sesudah Sisip	
100 kVA	2	2025	94	9	94,00	47	47
	3	2026	102,5	9,0	102,5	51,25	51,3
	4	2027	111	8,3	111	55,5	55,5
	5	2028	119,5	7,7	119,5	59,75	59,8
	6	2029	128	7,1	128	64	64,0
50 kVA	2	2025	94	9	94,00	62,67	31,3
	3	2026	102,5	9,0	102,5	68,33	34,2
	4	2027	111	8,3	111	74	37
	5	2028	119,5	7,7	119,5	79,67	39,8
	6	2029	128	7,1	128	85,33	42,7

Tabel 4. 9 Pemilihan Kapasitas Transformator

Berdasarkan Tabel 4.9 Apabila transformator sisipan menggunakan daya 50 kVA maka pembebanan transformator WMN 121 diperkirakan *overload* pada tahun 2029 dengan persentase pembebanan diperkirakan mencapai 85,33 % sedangkan untuk transformator sisipan memiliki persentase pembebanan diperkirakan mencapai 42,7 %. Apabila menggunakan kapasitas transformator sisipan sebesar 100 kVA, maka pada tahun 2029 diperkirakan untuk transformator WMN 121 belum mengalami *overload* dengan perkiraan persentase pembebanan WMN 121 mencapai 64 % sedangkan untuk transformator sisipan diperkirakan persentase pembebanan mencapai 64 %. Berdasarkan analisa tersebut maka untuk transformator sisipan WMN 121 menggunakan transformator dengan kapasitas 100 kVA, sehingga diharapkan dapat menampung beban lebih lama untuk beberapa tahun kedepan.

4.2.1.4 Pembagian Jalur Pelanggan Terjauh

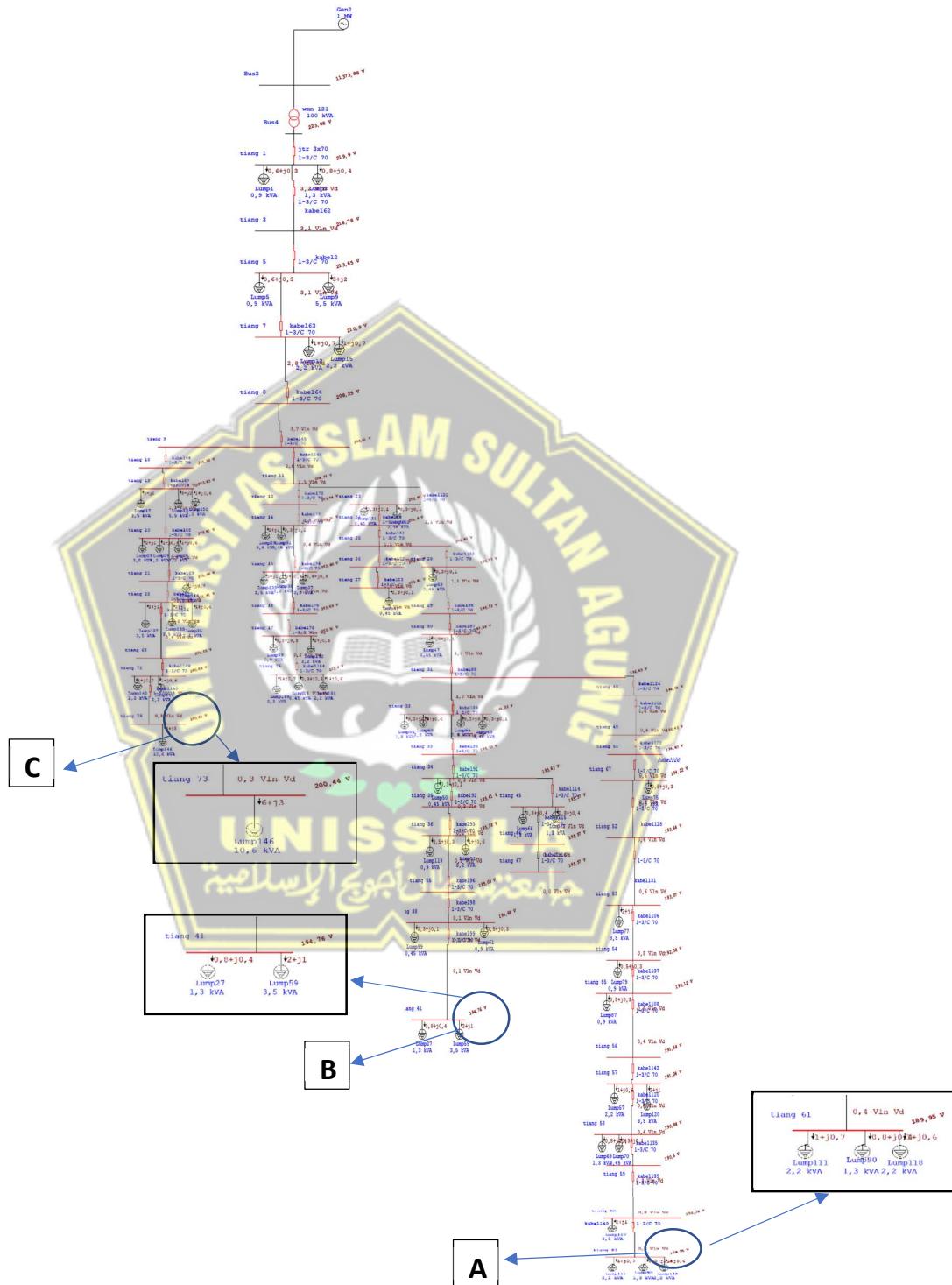


Gambar 4.5 Pembagian Jalur Pelanggan WMN 121

Berdasarkan gambar, jalur pelanggan WMN 121 dibagi menjadi 3 kelompok tegangan ujung, dengan rincian pada jalur A memiliki jarak 1.12 kms, pada jalur B sepanjang 0.95 kms, dan pada jalur C memiliki jarak sejauh 0.57 kms.

Dalam merencanakan lokasi transformator sisip untuk WMN 121 diperlukan simulasi pada aplikasi ETAP 12.6. Beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya drop tegangan adalah jumlah beban pelanggan, panjang penghantar JTR, jenis penghantar JTR yang digunakan, dan

ukuran penghantar JTR yang digunakan. Hasil dari simulasi ETAP 12.6 yang telah dilakukan, dapat dilihat pada Gambar 4.6 dan Tabel 4.5



Gambar 4.6 Simulasi ETAP Kondisi awal WMN 121

Jalur Bagian	Tegangan Panel (V)			Beban Pelanggan Terkontrak (kVA)	Jenis Penghantar	Panjang Penghantar (kms)	Tegangan Ujung (V)			Tegangan Jatuh (%)
	R-N	S-N	T-N				R-N	S-N	T-N	
A	226	228	224	22,85	NFA2X 3x70 + 70 mm ²	1,12		189,95		16,69
B				19,4	NFA2X 3x70 + 70 mm ²	0,95	194,76			13,82
C				48,35	NFA2X 3x70 + 70 mm ²	0,57			202,4	9,64

Tabel 4. 10 Hasil Simulasi ETAP 12.6

Berdasarkan Tabel 4.10 dapat diketahui tegangan ujung pada setiap bagian jalur pada pelanggan terjauh pada WMN 121. Pengukuran tegangan pada PHB TR dilakukan antara fasa dengan netral, sementara pengukuran tegangan pada pelanggan dilakukan pada kWh Meter pelanggan. Simulasi dilakukan untuk mengetahui besar jatuh tegangan yang terjadi pada pelanggan terjauh. Berikut ini adalah contoh perhitungan jatuh tegangan pada pelanggan jalur A :

$$\begin{aligned}
 \text{Jatuh Tegangan} &= \frac{Vs - Vr}{Vs} \times 100\% \\
 &= \frac{228 - 189,95}{228} \times 100\% \\
 &= 16,69\%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Standar PLN sesuai dengan SPLN 1 Tahun 1995, jatuh tegangan yang diizinkan adalah tidak lebih dari 10 % dari tegangan pelayanan. Pada jalur bagian A sesuai dengan kondisi yang ada, jatuh tegangan yang terjadi adalah sebesar 16,69 %, hal ini tentunya sudah dibawah dari standar yang sudah ditetapkan oleh PLN. Apabila kondisi ini terus berkelanjutan, maka akan menimbulkan kerugian di sisi pelanggan dan pada sisi PLN.

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, didapatkan hasil bahwa tegangan ujung jalur A mengalami penurunan sejumlah 16,69 %, Jalur B mengalami penurunan tegangan ujung sejumlah 13,82 %, sedangkan untuk jalur C mengalami penurunan tegangan ujung sejumlah 9,64 %. Dari ketiga jalur yang ada, maka jalur C yang masih sesuai untuk penurunan tegangan ujungnya yaitu tidak lebih dari 10 %. Oleh karena itu, jalur A dan B merupakan jalur prioritas untuk lokasi pemasangan transformator sisip.

4.2.1.5 Penentuan Lokasi Penempatan Transformator Sisip WMN 121

Dalam pemasangan transformator sisip, penentuan lokasi menjadi satu hal yang sangat penting. Pemilihan lokasi transformator sisipan sangat berpengaruh untuk perbaikan tegangan ujung pelanggan dan penurunan beban pada transformator WMN 121. Untuk menentukan lokasi trafo sisip dapat dilakukan perhitungan dengan menggunakan rumus berikut ini :

$$L = \frac{V_{vc} \times 10\%}{I_{beban\ puncak} \times R_{saluran}}$$

Dimana :

L = Jarak penempatan (km)

R = Tahanan Penghantar (Ω)

I = Arus yang mengalir pada penghantar (A)

V_{vc} = Besar tegangan pada penghantar (V)

10 % = Drop tegangan yang diizinkan

Maka dari itu, perlu diketahui berapa arus beban puncak dan nilai resistansi penghantar untuk perhitungan. Adapun perhitungan arus beban puncak sebagai berikut :

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

$$I_{rata-rata} = \frac{92,5 + 142,7 + 131,9}{3}$$

$$I_{rata-rata} = 122,37 \text{ A}$$

Dalam menentukan resistansi dari penghantar JTR NYAF2X 3 x 70 mm² + 70 mm² dengan panjang 1120 meter dapat menggunakan rumus berikut.

Diketahui,

$$A = 70 \text{ mm}^2 = 7 \times 10^{-5} \text{ M}^2$$

$$L = 1120 \text{ m}$$

Sehingga,

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$R = 2,65 \times 10^{-8} \frac{1120}{7 \times 10^{-5}}$$

$$R = 0,424 \Omega$$

Dimana :

$$\rho = 2,65 \times 10^{-8} \text{ (Hambatan Jenis Aluminium)}$$

$$L = \text{Panjang penghantar (M)}$$

$$A = \text{Luas Penampang (M}^2\text{)}$$

Setelah perhitungan arus beban dan resistansi, maka selanjutnya hasil tersebut dimasukan ke dalam rumus berikut ini.

$$L = \frac{400 \times 10\%}{122,37 \times 0,424}$$

$$L = 0,770 \text{ km}$$

Berdasarkan hasil perhitungan jarak penempatan transformator sisip, didapatkan jarak untuk pemasangan transformator sisip tersebut, yaitu sejauh 770 m. Selain meninjau perhitungan jarak penentuan lokasi transformator sisip, juga diperlukan survey lokasi.



Gambar 4.7 Rencana Lokasi Gardu Sisip WMN 121

4.2.2 Transformator WMN 069

Pada tanggal 31 Agustus 2024 saat waktu beban puncak (WBP), telah dilakukan pengukuran beban pada gardu distribusi WMN 069 dengan persentase pembebatan mencapai 94,85 % dari daya terpasang transformator. Gardu distribusi WMN 069 melayani kurang lebih 83 pelanggan dan memiliki jarak dengan pelanggan terjauh sepanjang 1,2 kms. Menurut SE DIR PT PLN (Persero) NO 017 Tahun 2014 dapat disimpulkan bahwa transformator pada gardu WMN 069 mengalami beban berlebih (*overload*) dan pengukuran tegangan pada kWh meter pelanggan terjauh didapatkan hasil 192 V.

4.2.2.1 Simulasi Kondisi Awal Transformator WMN 069 ETAP 12.6

Pada perencanaan pemasangan transformator sisipan ini memerlukan aplikasi ETAP 12.6 sebagai penunjang untuk simulasi kondisi pembebatan dan jatuh tegangan pada transformator WMN 069. Data yang akan digunakan pada simulasi merupakan data yang bersumber dari PLN ULP Wamena Kota berupa data pengukuran waktu beban puncak (WBP) tahun 2024.

ID	Type	kW Flow	kvar Flow	Amp Flow	% Loading	
T1	Transf. 2W	79,25	50,499	2,754	94	

Gambar 4.8 Hasil Simulasi Kondisi Awal Pembebanan Transformator WMN

069

Pada Gambar 4.6 menunjukkan hasil simulasi pembebanan transformator WMN 069 mencapai 94 %. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi yang telah dilakukan sudah sangat mendekati dengan hasil pengukuran yang dilakukan yaitu mencapai 94,85 %. Sehingga, simulasi ETAP 12.6 ini dapat digunakan untuk merencanakan transformator sisipan WMN 069.

4.2.2.2 Peramalan Beban

Berdasarkan SE DIR PT PLN (Persero) No 17 Tahun 2014, nilai pembebanan trafo yang diizinkan nilainya adalah sebesar 80 % dari kapasitas. Berdasarkan standar tersebut maka transformator WMN 069 telah mengalami beban lebih. Adapun nilai beban lebih dari transformator tersebut dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Persentase Beban Lebih} &= \% \text{ Beban saat ini} - \% \text{ Beban Health} \\ &\quad \text{Index} \\ \text{Persentase Beban Lebih} &= 95 \% - 80 \% \\ \text{Persentase Beban Lebih} &= 15 \% \end{aligned}$$

Sehingga berdasarkan perhitungan diatas, maka dapat dihitung kapasitas transformator yang diperlukan untuk transformator sisip.

$$\text{Beban} = \frac{\text{kelebihan beban} (\%)}{100\%} \times \text{kapasitas trafo terpasang}$$

$$\text{Beban} = \frac{15\%}{100\%} \times 100 \text{ kVA}$$

$$\text{Beban} = 15 \text{ kVA}$$

Maka, nilai kapasitas minimal transformator sisip yang diperlukan adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\text{Kapasitas minimal} &= \frac{\text{Beban}}{0,8} \text{ kVA} \\ &= \frac{15}{0,8} \text{ kVA} \\ &= 18,75 \text{ kVA}\end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan yang sudah dilakukan, maka minimal kapasitas transformator terpasang untuk sisipan WMN 069 adalah sebesar 18,75 kVA dan beban yang dapat dialihkan dari transformator WMN 069 ke sisipan adalah sebesar 15 kVA. Akan tetapi, dalam penentuan kapasitas transformator harus mempertimbangkan jumlah kenaikan beban di setiap tahunnya.

Dalam penentuan kenaikan jumlah beban setiap tahun, maka digunakan metode peramalan beban dengan metode *Least Square*. Adapun perhitungan peramalan beban pada transformator WMN 069 adalah sebagai berikut :

Tahun	2022	2023	2024
Beban Puncak (kVA)	81	85	95
Beban Puncak (%)	81	85	95

Tabel 4. 11 Pembebanan WMN 069 pada 3 Tahun Terakhir

No	Tahun	Beban Puncak (kVA)	X	XY	X ²
1	2022	81	-1	-81	1
2	2023	85	0	0	0
3	2024	95	1	95	1
$N = 3$		$\sum Y = 261$	0	$\sum XY = 14$	$\sum X^2 = 2$

Tabel 4. 12 Parameter Metode *Least Square*

1. Menghitung nilai a dan b

$$a = \frac{\sum Y}{n} = \frac{261}{3} = 87$$

$$b = \frac{\sum XY}{\sum X^2} = \frac{14}{2} = 7$$

2. Membuat persamaan *Least Square*

$$Y_n = a + bx = 87 + 7x$$

3. Hasil nilai Y_n pada tahun 2025, dengan nilai $x=2$

$$Y_n = a + bx$$

$$Y_n = 87 + 7 \times 2$$

$$Y_n = 101$$

4. Persentase beban pada tahun 2025

$$\text{Persentase Beban (\%)} = \frac{Y_n}{\text{Kapasitas Transformator}} \times 100\%$$

$$\text{Persentase Beban (\%)} = \frac{101 \text{ kVA}}{100 \text{ kVA}} \times 100\%$$

$$\text{Persentase Beban (\%)} = 101 \%$$

5. Persentase pertumbuhan beban

$$\text{Pertumbuhan beban (\%)} = \frac{\% \text{Beban 2025} - \% \text{Beban 2024}}{\% \text{Beban 2024}} \times 100\%$$

$$\text{Pertumbuhan beban (\%)} = \frac{101 \% - 95 \%}{95 \%} \times 100\%$$

$$\text{Pertumbuhan beban (\%)} = 6 \%$$

Apabila Transformator sisipan gardu WMN 069 menggunakan transformator 100 kVA, maka asumsi pembebanan dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\text{Beban asumsi (\%)} = \frac{101}{100 \text{ kVA} + 100 \text{ kVA}} \times 100\%$$

$$\text{Beban asumsi (\%)} = 50,5 \% \text{ (tahun 2025)}$$

$$\begin{aligned} \text{Beban teralihkan (\%)} &= 101 \% - 50,5 \% \\ \text{Beban teralihkan (\%)} &= 50,5 \% \end{aligned}$$

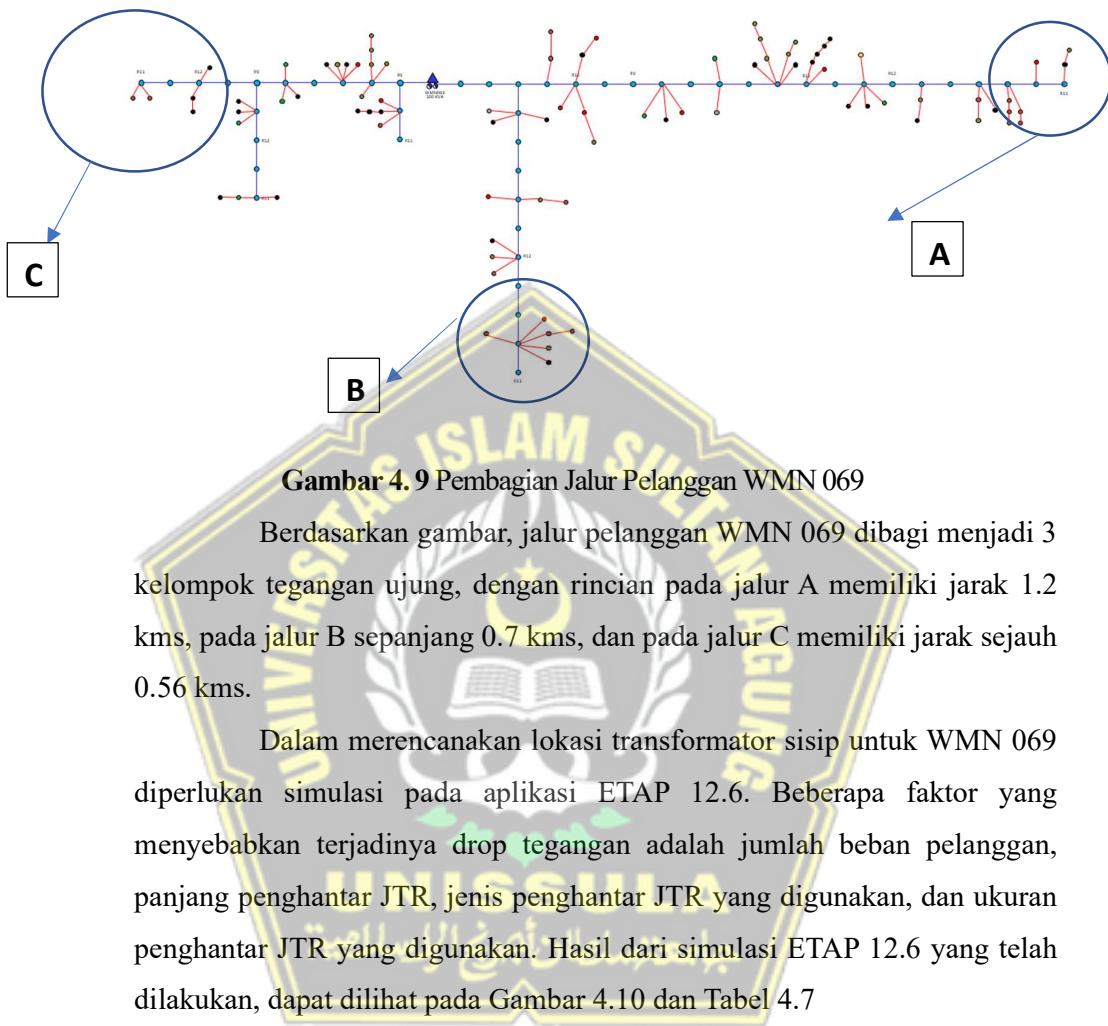
4.2.2.3 Pemilihan Kapasitas Transformator Sisipan WMN 069

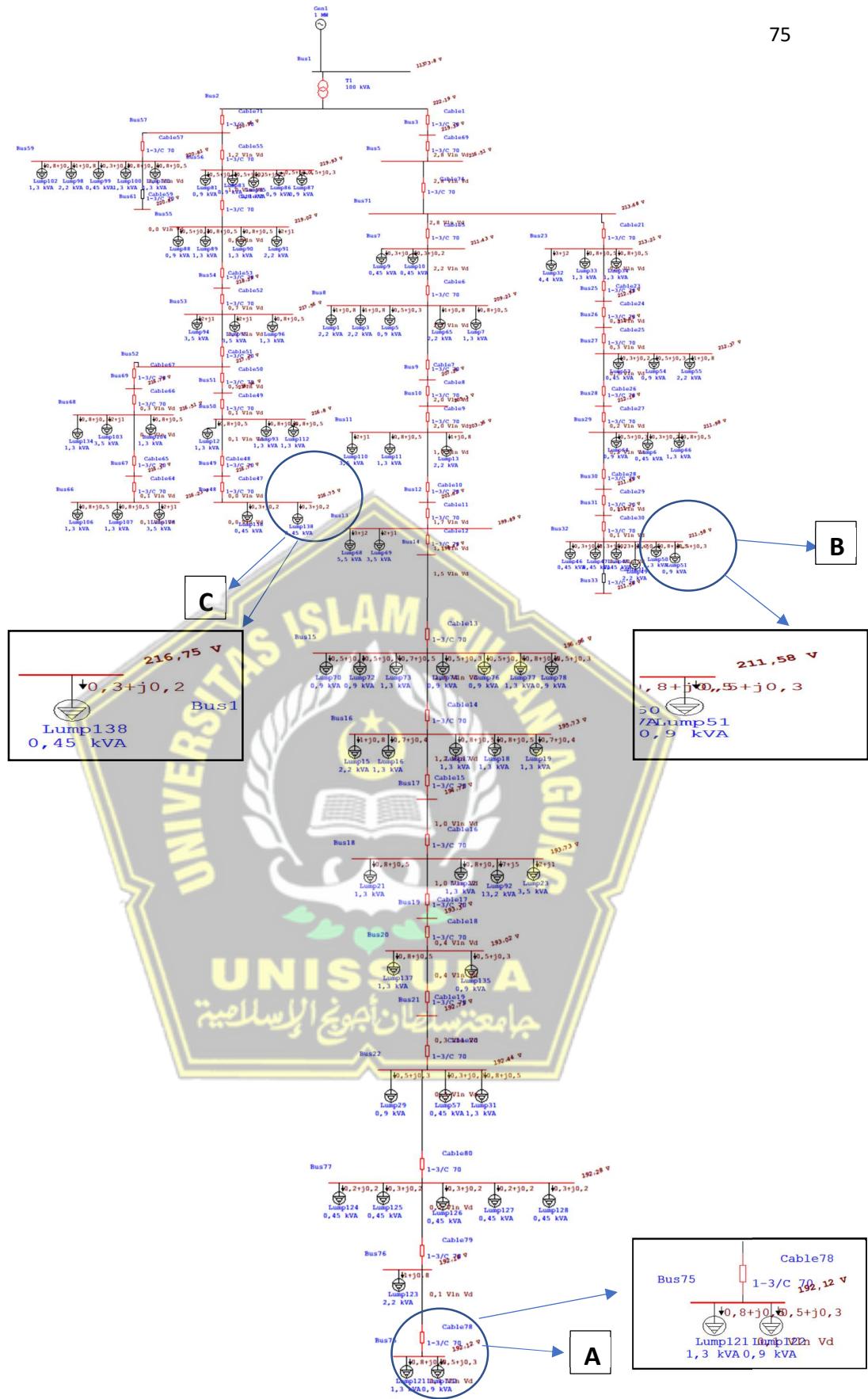
Kapasitas Trafo Sisipan	X	Tahun	Perkiraan Beban (kVA)	Pertumbuhan Beban (%)	Pembebanan WMN 069		Pembebanan Trafo Sisip (%)
					Sebelum Sisip (%)	Sesudah Sisip (%)	
100 kVA	2	2025	101	6	101	50,5	50,5
	3	2026	108	6,9	108	54	54,0
	4	2027	115	6,5	115	57,5	57,5
	5	2028	122	6,1	122	61	61,0
	6	2029	129	5,7	129	64,5	64,5
50 kVA	2	2025	101	6	101,00	67,33	33,7
	3	2026	108	6,9	108	72,00	36,0
	4	2027	115	6,5	115	77	38
	5	2028	122	6,1	122	81,33	40,7
	6	2029	129	5,7	129	86,00	43,0

Tabel 4. 13 Pemilihan Kapasitas Transformator

Berdasarkan Tabel 4.13 Apabila transformator sisipan menggunakan daya 50 kVA maka pembebanan transformator WMN 069 diperkirakan *overload* pada tahun 2029 dengan persentase pembebanan diperkirakan mencapai 86 % sedangkan untuk transformator sisipan memiliki persentase pembebanan diperkirakan mencapai 43 %. Apabila menggunakan kapasitas transformator sisipan sebesar 100 kVA, maka pada tahun 2029 diperkirakan transformator WMN 069 belum mengalami *overload* dengan perkiraan persentase pembebanan WMN 069 mencapai 64,5 % sedangkan untuk transformator sisipan diperkirakan persentase pembebanan mencapai 64,5 %. Berdasarkan analisa tersebut maka untuk transformator sisipan WMN 069 menggunakan transformator dengan kapasitas 100 kVA, sehingga diharapkan dapat menampung beban lebih lama dalam beberapa tahun kedepan.

4.2.2.4 Pembagian Jalur Pelanggan Terjauh





Gambar 4.10 Simulasi ETAP kondisi awal WMN 069

Jalur Bagian	Tegangan Panel (V)			Beban Pelanggan Terkontrak (kVA)	Jenis Penghantar	Panjang Penghantar (kms)	Tegangan Ujung (V)			Tegangan Jatuh (%)
	R-N	S-N	T-N				R-N	S-N	T-N	
A	217	223	220	71	NFA2X 3x70 + 70 mm ²	1,2	192,12			13,85
B				18,95	NFA2X 3x70 + 70 mm ²	0,7		211,58		2,50
C				42,05	NFA2X 3x70 + 70 mm ²	0,56		216,75		1,48

Tabel 4. 14 Hasil Simulasi ETAP 12.6

Berdasarkan Tabel 4.14 Dapat diketahui tegangan ujung pada setiap bagian jalur pada pelanggan terjauh pada WMN 069. Pengukuran tegangan pada PHB TR dilakukan antara fasa dengan netral, sementara pengukuran tegangan pada pelanggan dilakukan pada kWh Meter pelanggan. Simulasi dilakukan untuk mengetahui besar jatuh tegangan yang terjadi pada pelanggan terjauh. Berikut ini adalah contoh perhitungan jatuh tegangan pada pelanggan jalur A :

$$\begin{aligned}
 \text{Jatuh Tegangan} &= \frac{Vs - Vr}{Vs} \times 100 \% \\
 &= \frac{217 - 192,12}{217} \times 100 \% \\
 &= 13,85 \%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Standar PLN sesuai dengan SPLN 1 Tahun 1995, jatuh tegangan yang diizinkan adalah tidak lebih dari 10 % dari tegangan pelayanan. Pada jalur bagian A sesuai dengan kondisi yang ada, jatuh tegangan yang terjadi adalah sebesar 13,85 %, hal ini tentunya sudah dibawah dari standar yang sudah ditetapkan oleh PLN. Apabila kondisi ini terus berkelanjutan, maka akan menimbulkan kerugian di sisi pelanggan dan pada sisi PLN.

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, didapatkan hasil bahwa tegangan ujung jalur A mengalami penurunan sejumlah 13,85 %, Jalur B mengalami penurunan tegangan ujung sejumlah 2,50 %, sedangkan untuk jalur C mengalami penurunan tegangan ujung sejumlah 1,48 %. Dari ketiga jalur yang ada, maka jalur B dan C yang masih sesuai untuk penurunan tegangan ujungnya yaitu tidak lebih dari 10 %. Oleh karena itu, jalur A merupakan jalur prioritas untuk lokasi pemasangan transformator sisip.

4.2.2.5 Penentuan Lokasi Penempatan Transformator Sisip WMN 069

Dalam pemasangan transformator sisip, penentuan lokasi menjadi satu hal yang sangat penting. Pemilihan lokasi transformator sisipan sangat berpengaruh untuk perbaikan tegangan ujung pelanggan dan penurunan beban pada transformator WMN 069. Untuk menentukan lokasi trafo sisip dapat dilakukan perhitungan dengan menggunakan rumus berikut ini :

$$L = \frac{V_{IVC} \times 10\%}{I \text{ beban puncak} \times R \text{ saluran}}$$

Dimana :

L = Jarak penempatan (km)

R = Tahanan Penghantar (Ω)

I = Arus yang mengalir pada penghantar (A)

V_{IVC} = Besar tegangan pada penghantar (V)

10 % = Drop tegangan yang diizinkan

Maka dari itu, perlu diketahui berapa arus beban puncak dan nilai resistansi penghantar untuk perhitungan. Adapun perhitungan arus beban puncak sebagai berikut :

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

$$I_{rata-rata} = \frac{129,2 + 137 + 145}{3}$$

$$I_{rata-rata} = 137,06 \text{ A}$$

Dalam menentukan resistansi dari penghantar JTR NFA2X 3 x 70 mm² + 70 mm² dengan panjang 1200 meter dapat menggunakan rumus berikut.

Diketahui,

$$A = 70 \text{ mm}^2 = 7 \times 10^{-5} \text{ M}^2$$

$$L = 1200 \text{ m}$$

Sehingga,

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$R = 2,65 \times 10^{-8} \frac{1200}{7 \times 10^{-5}}$$

$$R = 0,454 \Omega$$

Dimana :

$$\rho = 2,65 \times 10^{-8} \text{ (Hambatan Jenis Aluminium)}$$

$$L = \text{Panjang penghantar (ft)}$$

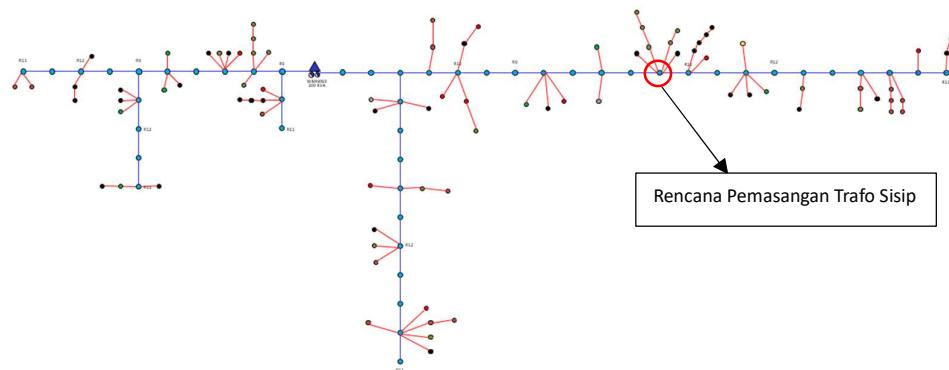
$$A = \text{Luas Penampang (Cm)}$$

Setelah perhitungan arus beban dan resistansi, maka selanjutnya hasil tersebut dimasukan ke dalam rumus berikut ini.

$$L = \frac{400 \times 10\%}{137,06 \times 0,454}$$

$$L = 0,642 \text{ km}$$

Berdasarkan hasil perhitungan jarak penempatan transformator sisip, didapatkan jarak untuk pemasangan transformator sisip tersebut, yaitu sejauh 642 m. Selain meninjau perhitungan jarak penentuan lokasi transformator sisip, juga diperlukan survey lokasi.



Gambar 4. 11 Rencana Transformator Sisip

Berdasarkan Gambar 4.8 didapatkan jarak untuk rencana penempatan transformator sisip sejauh 642 m. Dengan asumsi jarak antar tiang adalah sejauh 50 meter maka didapatkan tiang ke 12 dari transformator WMN 069 dengan prioritas jalur A. Survei lokasi untuk penempatan tranformator sisip diperlukan terkait perizinan dan agar perencanaan dapat efektif. Dokumentasi hasil survei lokasi adalah sebagai berikut.



Gambar 4. 12 Rencana Lokasi Gardu Sisip WMN 069

4.3 Penentuan Aksesoris Gardu Sisipan Pasang Luar

Setelah ditentukan rencana lokasi dan kapasitas transformator sisipan, selanjutnya diperlukan rincian aksesoris atau komponen gardu distribusi yang

direncanakan. Beberapa aksesoris yang terdapat pada gardu distribusi antara lain PHB TR, FCO, fuse link, busbar, dan lain lain.

4.3.1 Gardu Distribusi Sisipan Untuk WMN 121 & WMN 069

Gardu sisipan untuk WMN 121 & WMN 069 memiliki kapasitas transformator terpasang sebesar 100 kVA, berdasarkan hal tersebut maka spesifikasi komponen gardu distribusi yang akan dipasang adalah sebagai berikut :

A. Tiang SUTM

Berdasarkan Buku Standar Konstruksi Distribusi PLN Wilayah Papua dan Papua Barat Tahun 2018, menjelaskan bahwa untuk konstruksi transformator 50 kVA dan 100 kVA menggunakan tiang beton/besi minimal 12 meter 200 dan dengan menggunakan konstruksi gardu cantol.

B. Lightning Arrester

Sesuai dengan Buku Kriteria Desain Enjiniring Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik Tahun 2010, disebutkan bahwa untuk rating LA yang berada di tengah jaringan menggunakan rating 5 kA, dibumikan menggunakan kawat tembaga dengan luas penampang 35 mm^2 dan nilai tahanan pembumian tidak lebih dari 1 ohm. Adapun spesifikasi LA yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Rated Voltage : 24 kV (sistem pembumian dengan NGR) dan 16,8 - 24 kV (sistem pembumian langsung)
- Rated Current : 5 kA

C. Fuse Cut Out

Fuse Cut Out merupakan proteksi untuk melindungi jaringan tegangan menengah dari kerusakan yang diakibatkan gangguan arus lebih dengan cara memutuskan *fuse link* yang terdapat didalam tabung FCO sehingga dampak dari gangguan tidak meluas. Berikut ini adalah perhitungan untuk pemilihan rating *fuse link* untuk transformator 100 kVA :

$$I_{n\ fo} = \frac{kVA\ Transformator}{\sqrt{3} \times 20\ kV}$$

$$= \frac{100000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 20000 \text{ V}}$$

$$= 2,89 \text{ A}$$

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, maka untuk transformator 100 kVA *fuse link* menggunakan rating 2,89 A, dikarenakan di pabrikan tidak ada *fuse link* dengan rating tersebut maka menggunakan rating yang terdekat yaitu 3 A dengan kecepatan pemutusan tipe K atau tipe pemutusan cepat.

D. Pengantar *Outgoing* Transformator Menuju PHB-TR

Sesuai dengan Buku Kriteria Desain Enjiniring Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik Tahun 2010, untuk pengantar *outgoing* transformator menuju PHB TR setidaknya memiliki nilai KHA 115 % dari arus nominal transformator pada sisi tegangan rendah.

$$I_{n \text{ tegangan rendah}} = \frac{kVA \text{ Transformator}}{\sqrt{3} \times 400 \text{ V}}$$

$$= \frac{100000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 400 \text{ V}}$$

$$= 144,5 \text{ A}$$

$$I_{KHA \text{ kabel}} = 115 \% \times I_n \text{ Tegangan rendah}$$

$$= 115 \% \times 144,5 \text{ A}$$

$$= 166,175 \text{ A}$$

Berdasarkan perhitungan diatas, dapat diketahui bahwa nilai KHA kabel adalah 166, 175 A. Maka, dipilih kabel NYY *single core* merk Supreme dengan minimal luas penampang adalah 35 mm² dengan KHA 170 A.



Nominal cross-sectional area mm²	ELECTRICAL DATA		Current Carrying Capacity at 30 °C		Short circuit current of conductor at 1.0 sec kA
	DC conductor max Ω/Km	Insulation min MΩ.Km	In AIR	In GROUND	
			Ⓐ	Ⓐ	
1.5	12.1	50	26	33	0.19
2.5	7.41	50	25	45	0.32
4	4.61	50	46	58	0.50
6	3.08	50	58	74	0.73
10	1.83	50	80	98	1.20
16	1.15	40	100	107	1.91
25	0.727	40	135	138	2.96
35	0.524	40	170	185	4.13
50	0.387	30	205	196	5.87
70	0.268	30	260	240	8.19
95	0.193	30	320	289	11.09
120	0.153	30	375	329	13.98
150	0.124	20	420	374	17.46
185	0.0991	20	490	418	21.50
240	0.0754	20	590	481	27.86
300	0.0601	20	680	552	34.79
400	0.0470	20	825	632	41.50
500	0.0366	20	960	730	51.84

Gambar 4.13 Katalog Kabel NYY

E. PHB TR

Panel hubung bagi tegangan rendah (PHB TR) merupakan alat yang berfungsi untuk membagikan keluaran transformator menjadi beberapa jurusan. Berdasarkan Buku Standar Konstruksi Distribusi PLN Wilayah Papua dan Papua Barat tahun 2018, disebutkan bahwa untuk transformator 50 kVA dan 100 kVA menggunakan PHB TR 2 jurusan yang terbuat dari bahan fiber dan atau plat dengan tebal minimal 2,8 mm.

Proteksi di dalam PHB TR dapat berupa MCCB atau NH Fuse Utama sebagai pengaman yang utama dan terdapat NH fuse Jurusan untuk mengamankan masing-masing jurusan yang terdapat pada gardu tersebut.

1. Saklar Utama

Saklar utama harus memiliki arus pengenal yang setidaknya sama atau lebih besar dari nilai KHA kabel NYY incoming PHB TR. Berikut ini adalah perhitungan pemilihan rating arus untuk sakelar utama:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{In tegangan rendah}} &= \frac{kVA \text{ Transformer}}{\sqrt{3} \times 400 V} \\
 &= \frac{100000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 400 V}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 144,5 \text{ A} \\
 I_{\text{KHA kabel}} &= 115 \% \times I_n \text{ Tegangan rendah} \\
 &= 115 \% \times 144,5 \text{ A} \\
 &= 166,175 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan diatas, maka pemilihan pengaman utama minimal rating yang digunakan adalah sebesar 166,175 A.

2. Busbar

Sesuai dengan Buku Kriteria Desain Enjiniring Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik Tahun 2010, dijelaskan bahwa KHA maksimum rel tidak kurang dari 125 % dari KHA kabel NYY incoming PHB TR yang digunakan. KHA busbar dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 I_n \text{ tegangan rendah} &= \frac{kVA \text{ Transformator}}{\sqrt{3} \times 400 V} \\
 &= \frac{100000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 400 V} \\
 &= 144,5 \text{ A} \\
 I_{\text{KHA Busbar}} &= 125 \% \times I_n \text{ Tegangan rendah} \\
 &= 125 \% \times 144,5 \text{ A} \\
 &= 180,625 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan maka busbar pada PHB TR menggunakan busbar dengan bahan tembaga dengan ukuran minimal $15 \times 3 \text{ mm}$ dengan luas penampang 45 mm^2

Ukuran	Penam-pang	Berat	Pembebanan kontinu (A)															
			Arus bolak-balik						Arus searah									
			Dilapisi lapisan konduktif Jumlah batang			Telanjang Jumlah batang			Dilapisi lapisan konduktif Jumlah batang			Telanjang Jumlah batang						
mm	mm ²	kg/m	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
12 x 2	24	0,23	123	202	-	-	100	182	-	-	123	202	-	-	108	210	-	-
15 x 2	30	0,27	148	240	-	-	128	252	-	-	148	240	-	-	128	255	-	-
15 x 3	45	0,40	187	316	-	-	162	282	-	-	187	316	-	-	162	305	-	-
20 x 2	40	0,36	205	350	-	-	185	315	-	-	210	370	-	-	190	330	-	-
20 x 3	60	0,53	237	394	-	-	204	384	-	-	237	435	-	-	203	395	-	-
20 x 5	100	0,89	325	470	-	-	290	495	-	-	330	570	-	-	300	515	-	-
25 x 3	75	0,67	287	766	-	-	245	412	-	-	287	530	-	-	275	485	-	-
25 x 5	125	1,11	385	670	-	-	350	600	-	-	400	680	-	-	360	620	-	-
30 x 3	90	0,80	350	600	-	-	315	540	-	-	448	630	-	-	325	570	-	-
30 x 5	150	1,34	448	760	-	-	379	672	-	-	475	800	-	-	425	725	-	-
40 x 3	120	1,07	460	780	-	-	420	710	-	-	470	820	-	-	425	740	-	-
40 x 5	200	1,78	576	952	-	-	482	836	-	-	576	1030	-	-	550	985	-	-
40 x 10	400	3,56	865	1470	2060	2800	715	1290	1650	2500	865	1550	2180	-	800	1395	1950	-
50 x 5	250	2,23	703	1140	1750	2310	588	994	1550	2100	703	1270	1870	-	660	1150	1700	-
50 x 10	500	4,46	1050	1720	2450	3330	852	1510	2200	3000	1020	1900	2700	-	1000	1700	2400	-
60 x 5	300	2,67	825	1400	1983	2650	750	1300	1800	2400	870	1500	2200	2700	780	1400	1900	2500
60 x 10	600	5,34	1230	1960	2800	3800	985	1720	2500	3400	1230	2200	3100	3900	1100	2000	2800	3500
80 x 5	400	3,56	1060	1800	2450	3300	950	1650	2700	2900	1150	2000	2800	3500	1000	1800	2500	3200
80 x 10	800	7,12	1590	2410	3450	4600	1240	2110	3100	4200	1590	2800	4000	5100	1450	2600	3600	4500
100 x 5	500	4,45	1310	2200	2950	3800	1200	2000	2800	3400	1400	2500	3400	4300	1250	2250	3000	3900
100x10	1000	8,90	1940	2850	4000	5400	1490	2480	3600	4800	1940	3600	4900	6200	1700	3200	4400	5500

Gambar 4.14 Daftar Pembebanan Pengantar Kontinu Untuk

Tembaga Penampang Persegi

(Sumber PUIL 2000:235)

3. Fuse Rail

Fuse rail adalah tempat dasar bagi NH fuse yang memiliki bentuk seperti jepitan dengan dua permukaan bidang kontak. Fungsi fuse rail ini adalah untuk menjepit fuse dan sebagai titik penghubung antara busbar dan saluran pembagi.. Apabila menggunakan pengaman utama berupa NH Fuse maka harus menentukan rating fuse rail yang akan digunakan. Adapun cara penentuan rating fuse rail utama adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 & I_{\text{tg}} \text{ tegangan rendah} \quad kVA \text{ Transformator} \\
 & = \frac{kVA \text{ Transformator}}{\sqrt{3} \times 400 V} \\
 & = \frac{100000 kVA}{\sqrt{3} \times 400 V} \\
 & = 144,5 A
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, maka dipilih rating fuse rail minimal yang memiliki KHA 144,5 A

4. NH Fuse

Pada PHB TR apabila sebagai pengaman utama adalah NH Fuse maka penentuan rating NH fuse Utama dapat dihitung menggunakan rumus berikut ini :

$$\begin{aligned}
 I_n \text{ tegangan rendah} &= \frac{kVA \text{ Transformator}}{\sqrt{3} \times 400 V} \\
 &= \frac{100000 kVA}{\sqrt{3} \times 400 V} \\
 &= 144,5 A \\
 I_n \text{ NH Fuse} &= 0,8 \times I_n \text{ tegangan rendah} \\
 &= 0,8 \times 144,5 \\
 &= 115,6 A
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan diatas, maka rating NH fuse utama yang digunakan adalah menggunakan rating 125 A. Selain NH fuse utama, pada PHB TR juga terdapat NH fuse jurusan. Dalam penentuan NH fuse gardu 2 jurusan dapat menggunakan perhitungan berikut ini :

$$\begin{aligned}
 I_n \text{ NH Fuse jurusan} &= I_n \text{ NH Fuse : 2} \\
 &= 115,6 A : 2 \\
 &= 57,8 A
 \end{aligned}$$

Hasil dari perhitungan diatas adalah rating NH fuse 2 jurusan adalah sebesar 57,8 A. Dengan hal ini maka pada NH fuse jurusan tersebut menggunakan NH fuse dengan rating 63 A.

5. Pengantar Kabel *Outgoing* PHB TR

Jumlah kabel output dari PHB-TR bergantung dari jumlah jurusan. Pada Gardu dengan transformator 100 kVA menggunakan 2 jurusan tegangan rendah. Dalam penentuan kabel yang digunakan, maka diperlukan minimal kuat hantar arus pada kabel tersebut. Berikut ini merupakan perhitungan kuat hantar arus kabel:

$$\begin{aligned}
 I_n \text{ jurusan} &= I_n \text{ tegangan rendah : 2} \\
 &= 144,5 : 2 \\
 &= 72,25 A \\
 I_{KHA} \text{ Jurusan} &= 115 \% \times I_n \text{ jurusan} \\
 &= 115 \% \times 72,25
 \end{aligned}$$

$$= 83 \text{ A}$$

Berdasarkan perhitungan diatas maka dipilih kabel NFA2X-T dengan minimal ukuran luas penampang adalah $3 \times 35 \text{ mm}^2 + 35 \text{ mm}^2$

Jumlah Inti Ukuran Luas Penampang (nom.)	mm^2	3 PENGHANTAR (Fase) + 1 PENGGANTUNG (Netral)		
		3 x 35 + 35	3 x 50 + 50	3 x 70 + 70
ELEKTRIS				
Tegangan Uji (AC)	kV/5 mnt	3.5	3.5	3.5
Maksimum Tahanan Pada Inti Penghantar	Ω/km	0.068	0.041	0.043
Maksimum Tahanan Pada Inti Penggantung (Netral)	Ω/km	0.036	0.055	0.018
Minimum Tahanan Isolasi	MΩ.km	1,000	900	900
Kuat Hantar Arus Pada Suhu 35°C	A	125	154	196
	0.1 detik	kA	10.63	15.18
Maksimum Arus Hubung Singkat Sesaat	0.5 detik	kA	4.75	6.79
	1.0 detik	kA	3.36	4.80
				6.72

Gambar 4. 15 Katalog Kabelindo NFA2X-T

6. Pembumian

Pada gardu distribusi pasang luar terdapat beberapa bagian yang harus dibumikan, antara lain *Lightning Arrestor*, *Body transformator*, *Body PHB TR* dan *Netral* pada *PHB TR*. Untuk mencegah kerusakan atau pencurian, penghantar pembumian harus dilindungi dengan pipa galvanis berukuran $\frac{3}{4}$ inch dan memiliki tinggi minimal 3 meter dari permukaan tanah, serta diisi dengan adukan cor beton. Penghantar pembumian menggunakan *kawat tembaga* (BC) dengan ukuran 50 mm^2 . Elektroda pembumian berupa batang dengan panjang minimal 3 meter, dan nilai tahanan pembumian tidak boleh lebih dari 1 Ohm.

Setelah mempertimbangkan rating dan spesifikasi beberapa komponen gardu distribusi, selanjutnya diperlukan rincian untuk komponen atau aksesoris gardu distribusi lainnya yang dapat dilihat pada Tabel 4.15

No.	NOMOR SAP	NAMA MATERIAL	STN	KEBUTUHAN
1		Tiang 12-200 daN	Btg	1
2		Trafo 3 phs 25 s/d 50 KVA	Bh	1
3		Isolator tumpu 20 KV	Set	3
4		Al. bending wire	Mtr	3
5		Cross Arm 2 mtr UNP 10 5 mm	Btg	2
6		U-Bolt	Bh	2
7		Arm Tie LNP.8 50x50x5x1000+bolt M16 – 50	Btg	2
8		Arm band type I	Set	2
9		Klem Type H.Al	Bh	3
10		L. Arrestor 24 kV 5 kA lengkap mounting	Set	3
11		F. Cut Out 24 kV 100 A lengkap mounting	Set	3
12		Box TR lengkap MCB	Set	1
13		Dudukan Trafo Cantol	Set	1
14		dudukan Box TR	Set	1
15		Pipa PVC AW 2" 6 mtr + Elbow	Btg	2
16		Pegangan pipa UNP 8-5 mm + Beugel + U-Bolt	Set	2
17		Kabel NYY	Mtr	48
18		Kabel skun bimetal Al-Cu untuk A3C 35 mm ²	Bh	3
19		Kabel skun bimetal Al-Cu untuk NYY	Bh	4
20		Arde L. Arrestor dan Bodi Trafo	Set	1
21		Arde kasten/rak TR	Set	1
22		Penghalang Panjat	Bh	1
23		Tanda Kilat Besar 20 KV	Bh	1
24		Kawat AAAC 35 mm ²	Mtr	6
25		Pengecatan Tiang	Set	1
26		Pondasi M24.A	Set	1

Tabel 4. 15 Komponen untuk Gardu Cantol

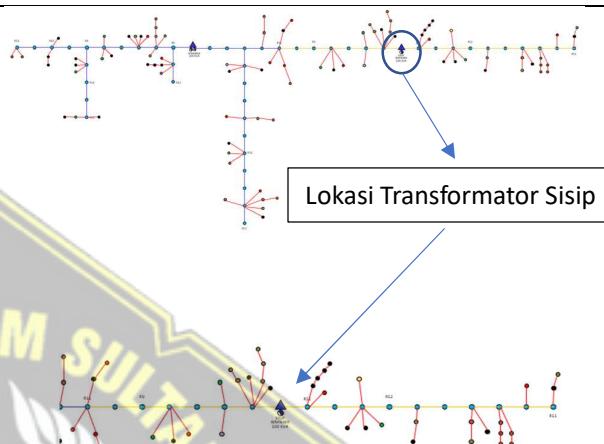
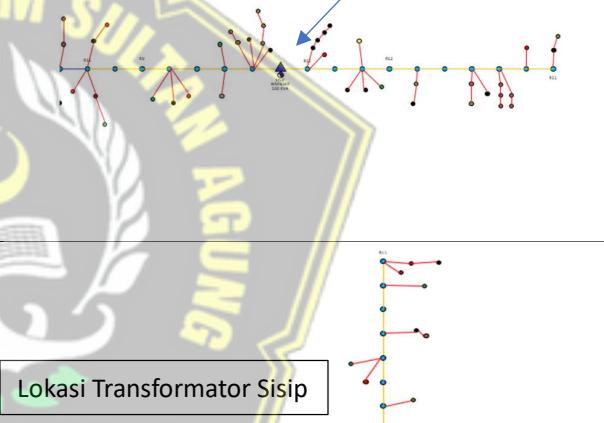
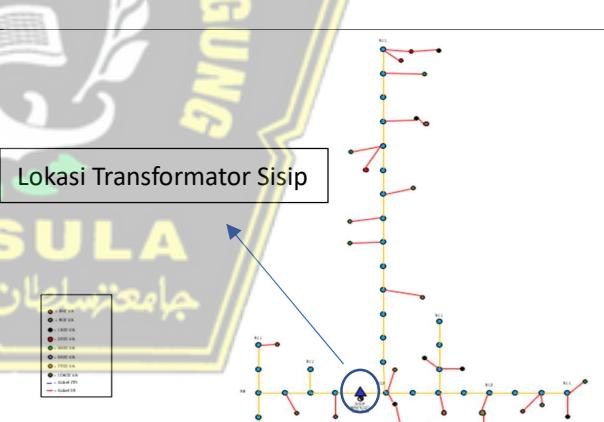
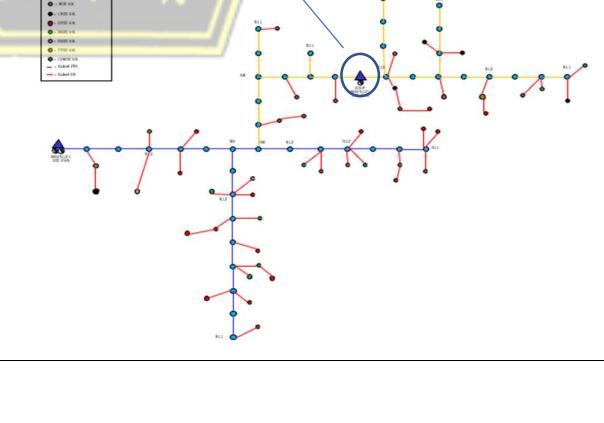
4.4 Analisis Setelah Pemasangan Transformator Sisip

Lokasi pemasangan transformator sisipan sudah dilakukan analisa serta perhitungan, oleh karena itu diperlukan simulasi Etap 12.6 untuk mengetahui gambaran kondisi pembebatan dan tegangan ujung dari masing-masing gardu.

4.4.1 Kondisi Pembebatan Setelah Sisip Transformator

Pemasangan transformator sisip untuk WMN 121 memiliki jarak kurang lebih 770 meter dari gardu, sedangkan untuk WMN 069 rencana pemasangan transformator sisip memiliki jarak kurang lebih 642 meter dari gardu. Kedua lokasi tersebut menjadi titik pemasangan transformator sisip pada simulasi Etap 12.6

Tabel 4. 16 Simulasi Pembagian Jalur Pelanggan dengan Etap 12.6

Trafo	Beban Sebelum Dipindahkan (kVA)	Beban Sesudah Dipindahkan (kVA)	Gambar
WMN 069	95	45	
Sisip WMN 069	0	50	
WMN 121	85	54,8	
Sisip WMN 121	0	30,3	

Pada Tabel 4.16 diketahui bahwa jalur yang berwarna kuning merupakan jalur beban yang ditanggung oleh transformator sisipan WMN 121 dan WMN 069. Sedangkan untuk jalur pembebanan berwarna biru merupakan jalur yang ditanggung oleh gardu WMN 121 dan WMN 069.

Setelah dilakukan simulasi Etap 12.6 didapatkan hasil pembebanan Transformator WMN 121 setelah sisip transformator adalah sebesar 54 % dari kapasitas transformator. Hal ini tentunya setelah pelaksanaan sisip maka transformator WMN 121 mengalami penurunan pembebanan sejumlah 30 % yang berpindah ke transformator sisip. Sedangkan untuk transformator WMN 069 setelah dilakukan sisip transformator, untuk pembebanan menjadi 45 % dari kapasitas daya terpasang. WMN 069 mengalami penurunan pembebanan sejumlah kurang lebih 45 % yang berpindah ke transformator sisipan,

4.4.2 Kondisi Tegangan Ujung Setelah Sisip Transformator

Jarak pelanggan terjauh WMN 121 dan 069 adalah 1,12 kms dan 1,2 kms dari transformator. Kedua titik pelanggan terjauh tersebut mengalami jatuh tegangan yang melebihi standar yang sudah ditetapkan oleh PLN, dimana jatuh tegangan tidak boleh melebihi 10 % dari tegangan pelayanan. Setelah sisip transformator dilakukan, maka pada tegangan pelanggan ujung WMN 121 dan WMN 069 mengalami perubahan yang dapat dilihat pada Tabel 4.17

Tabel 4. 17 Hasil Jatuh Tegangan Transformator WMN 121 dan WMN 069 Sesudah Pemasangan Transformator Sisip.

Transformator	Jalur Bagian	Tegangan Ujung (V)		Jatuh Tegangan (%)		Kesesuaian
		Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	
WMN 121	A	189,95	221,95	-16,69	-2,6	Sesuai
	B	194,76	225,88	-13,82	0	Sesuai
	C	202,4	210,96	-9,64	-5,8	Sesuai
WMN 069	A	192,12	220,91	-13,85	+1,8	Sesuai
	B	216,75	223,33	-2,50	0	Sesuai
	C	211,58	221,7	-1,48	+0,78	Sesuai

Pada Tabel 4.17 dapat diketahui bahwa telah terjadi perubahan jatuh tegangan pada pelanggan terjauh dari Transformator WMN 121 dan WMN 069. Pelanggan terjauh Transformator WMN 121 yaitu Jalur Bagian A mengalami perubahan jatuh tegangan dari 16,69% menjadi 2,6%. Untuk Transformator WMN 069 memiliki perubahan jatuh tegangan pada jalur terjauh yaitu jalur A dari 13,85% menjadi +1,8 % dari tegangan panel PHB TR pada gardu. Berdasarkan SPLN 1, 1995, seluruh nilai tegangan ujung setelah pemasangan transformator sisipan sudah sesuai yaitu tidak lebih dari 5% dan kurang dari 10%.

4.5 Perbandingan Analisa perhitungan dengan ETAP

A. Perbandingan Persentase Pembebanan

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan dan simulasi ETAP, diperoleh data sebagai berikut:

1. Transformator WMN 069
 - Hasil Perhitungan: 94,85%
 - Hasil Simulasi ETAP: 94%
2. Transformator WMN 121
 - Hasil Perhitungan: 84,7%
 - Hasil Simulasi ETAP: 83%

B. Perbandingan Tegangan Ujung Pelanggan

1. Pelanggan WMN 069
 - Nilai pada kondisi sebenarnya: 192,4 V
 - Hasil Simulasi ETAP: 192,12 V
2. Pelanggan WMN 121
 - Nilai pada kondisi sebenarnya: 190 V
 - Hasil Simulasi ETAP: 189,95 V

C. Melakukan Simulasi Pecah Beban Pada ETAP Berdasarkan Nilai Jarak Penempatan Transformator Sisip

berdasarkan perhitungan jarak penempatan transformator sisip, diperoleh hasil sebagai berikut:

- Transformator Sisip WMN 121: 770 meter dari lokasi WMN 121
- Transformator Sisip WMN 069: 642 meter dari lokasi WMN 069

Setelah menerapkan hasil perhitungan jarak penempatan transformator sisip ke dalam simulasi ETAP, diperoleh distribusi pembebanan sebagai berikut:

- Transformator WMN 069 menampung beban sebesar 44,9%, sedangkan transformator sisipannya menampung beban 51,2%.
- Transformator WMN 121 menampung beban sebesar 55,8%, sedangkan transformator sisipannya menampung beban 30,3%.

Hasil simulasi ETAP menunjukkan nilai yang sangat mendekati hasil perhitungan dan kondisi yang sebenarnya di lapangan, baik dalam persentase pembebanan transformator maupun tegangan ujung pelanggan. Hal ini membuktikan bahwa simulasi ETAP dapat digunakan sebagai alat bantu yang valid dalam menentukan persentase pembebanan transformator eksisting serta transformator sisip. Selain itu, dengan menggunakan metode ini, pembagian beban antar transformator dapat dioptimalkan, sehingga sistem distribusi tenaga listrik dapat berjalan secara aman, andal dan sesuai dengan standar yang ditetapkan PLN.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil analisa perencanaan pemasangan transformator sisipan yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan yaitu :

- 1 Kondisi awal pembebanan dan penurunan tegangan pada Transformator WMN 121 dan WMN 069 sebelum pemasangan transformator sisipan adalah sebagai berikut.:
 - a. Transformator WMN 121 merupakan transformator distribusi dengan kapasitas 100 kVA. Saat beban puncak (WBP), pembebanannya mencapai 84,7%, yang melebihi batas standar PLN sebesar 80% (SE DIR PT. PLN (Persero) No.0017, 2014), sehingga dapat dikategorikan sebagai overload atau kelebihan beban. Selain itu, tegangan ujung pelanggan terjauh dari Transformator WMN 121 tercatat sebesar 190 V, mengalami drop voltage sebesar 16,6%, yang melampaui batas standar jatuh tegangan menurut SPLN No.1 Tahun 1995.
 - b. Transformator WMN 069 merupakan transformator distribusi dengan kapasitas 100 kVA. Saat beban puncak (WBP), nilai pembebanannya mencapai 94,8%, yang melebihi batas standar PLN sebesar 80% (SE DIR PT. PLN (Persero) No.0017, 2014), sehingga dapat dikategorikan sebagai overload. Selain itu, tegangan ujung pelanggan terjauh dari Transformator WMN 069 tercatat sebesar 192,4 V, mengalami drop voltage sebesar 13,8%, yang melampaui batas standar jatuh tegangan menurut SPLN No.1 Tahun 1995.
 - c. Transformator yang mengalami *overload* dapat mengalami peningkatan suhu, yang berpotensi memperpendek umur operasionalnya. Sementara itu, *drop voltage* pada tegangan ujung dapat menyebabkan kerusakan pada instalasi serta peralatan listrik pelanggan.
- 2 Perencanaan pemasangan transformator sisipan WMN 121 perlu beberapa tahap perencanaan yaitu,
 - a. Simulasi kondisi awal pada aplikasi ETAP 12.6.

- b. Peramalan beban dan penentuan kapasitas transformator sisipan,
 - c. Pembagian jalur bagian pelanggan terjauh dan
 - d. Penentuan lokasi pemasangan. Perencanaan pemasangan transformator sisipan juga dibantu dengan aplikasi ETAP 12.6 untuk mendapatkan hasil pembebanan dan tegangan ujung.
- 3 Hasil dari perencanaan pemasangan transformator sisipan pada Transformator WMN 121 adalah :
- a. Aplikasi ETAP 12.6 sudah sangat mendekati dengan kondisi awal Transformator, WMN 121 dalam hal pembebanan (85 %) dan tegangan ujung pelanggan terjauh (190 V) pada pengukuran tahun 2024
 - b. Kapasitas Transformator sisipan WMN 121 adalah 100 kVA sesuai dengan perhitungan peramalan beban untuk kebutuhan pelanggan beberapa tahun kedepan.
 - c. Pemasangan transformator sisipan dilakukan pada estimasi jarak 770 m dari Transformator WMN 121.
- 4 Hasil dari perencanaan pemasangan transformator sisipan pada Transformator WMN 069 adalah :
- a. Aplikasi ETAP 12.6 sudah sangat mendekati dengan kondisi awal Transformator, WMN 069 dalam hal pembebanan (94,8 %) dan tegangan ujung pelanggan terjauh (192,4 V) pada pengukuran Tahun 2024,
 - b. Kapasitas Transformator sisipan WMN 069 adalah 100 kVA sesuai dengan perhitungan peramalan beban untuk kebutuhan pelanggan beberapa tahun kedepan,
 - c. Pemasangan transformator sisipan dilakukan pada estimasi jarak 642 m dari Transformator WMN 069.
- 5 Hasil dari pemasangan transformator sisipan adalah :
- a. Setelah pemasangan transformator sisipan, pembebanan pada Transformator WMN 121 berkurang dari 85% menjadi 54,8%, sesuai dengan ketentuan SE DIR PT. PLN (Persero) No.0017 Tahun 2014, yang menetapkan batas maksimal 80%. Selain itu, tegangan ujung pelanggan terjauh pada transformator WMN 121 meningkat dari 190 V (-16,7%) menjadi 221,9 V, yang telah memenuhi standar SPLN No.1 Tahun 1995,

- di mana tegangan pelanggan harus berada dalam rentang -10% hingga +5%.
- b. Setelah pemasangan transformator sisipan, pembebanan pada Transformator WMN 069 berkurang dari 94,8% menjadi 45%, sesuai dengan ketentuan SE DIR PT. PLN (Persero) No.0017 Tahun 2014, yang menetapkan batas maksimal 80%. Selain itu, tegangan ujung pelanggan terjauh pada transformator WMN 069 meningkat dari 192 V (penurunan 13,85%) menjadi 220,9 V, yang telah memenuhi standar SPLN No.1 Tahun 1995, di mana tegangan pelanggan harus berada dalam rentang -10% hingga +5%.
- 6 Kondisi transformator sisipan WMN 121 dan WMN 069 setelah disimulasikan pada Aplikasi ETAP 12.6 yaitu :
- Kondisi transformator sisipan WMN 121 memiliki pembebanan sebesar 30 %.
 - Kondisi transformator sisipan WMN 069 memiliki pembebanan sebesar 50 %.
 - Kedua transformator sisipan tersebut sudah sesuai dengan standar PLN (SE DIR PT. PLN (Persero) No.0017, 2014) yaitu dibawah 80%.
- 7 Penentuan material dan komponen diperlukan untuk pemasangan gardu distribusi transformator sisipan WMN 121 dan WMN 069 harus sesuai dengan standar PLN yang berlaku (SK GM PT. PLN (Persero) UIW P2B No.0017.K/GM.WP2B/2018). Beberapa komponen utama yang ditentukan adalah Tiang TM, *Lightning Arrester*, *Fuse Cut Out*, penghantar pada gardu, PHB-TR dan komponen pendukung lainnya.
- 8 Pemasangan transformator sisipan memiliki manfaat dalam memperbaiki kondisi transformator yang mengalami beban berlebih serta meningkatkan tegangan ujung. Dengan mengurangi beban berlebih, umur operasional transformator dapat diperpanjang. Selain itu, perbaikan tegangan ujung yang mengalami drop voltage membantu mencegah kerusakan pada instalasi dan komponen listrik pelanggan. Ke depannya, pemasangan transformator sisipan juga dapat menjadi alternatif dalam perluasan jaringan dan pemecahan beban JTR.

5.2 Saran

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemasangan transformator sisipan mampu mengatasi masalah drop tegangan dan beban berlebih pada Transformator WMN 121 dan WMN 069. Oleh karena itu, disarankan agar PLN ULP Wamena Kota memilih lokasi pemasangan yang sesuai dengan hasil analisis penelitian ini guna menyelesaikan permasalahan tersebut secara optimal.



Daftar Pustaka

- Angga Setia, G. et al. (2022) 'Studi Penambahan Gardu Sisipan Tipe Tiang untuk Mengatasi Beban Lebih di PT PLN (PERSERO) Area Cianjur Rayon Mande
- Harahap, P., Adam, M. and Prabowo, A. (2019) 'Analisa Penambahan Trafo Sisip Sisi Distribusi 20 kV Mengurangi Beban Overload dan Jatuh Tegangan Pada Trafo BI 11 Rayon Tanah Jawa Dengan Simulasi Etab 12.6.0', *Jurnal Teknik Elektro*, 1.
- Kelompok Kerja Standar Kontruksi Disribusi Jaringan Tenaga Listrik dan Pusat Penelitian Sains dan Teknologi Universitas Indonesia (2010) *Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik*. Jakarta Pusat: PT PLN (PERSERO).
- Khalifa, F.S. (2019) *Fundamentals of Electrical Engineering*.
- Marsudi, D. (2016) *Operasi Sistem Tenaga Listrik*.
- PT PLN (PERSERO) (2014) *Metode Pemeliharaan Trafo Distribusi Berbasis Kaidah Manajemen Aset*.
- Ridwan, M. (2024) 'Analisa Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Untuk Mengurangi Rugi-Rugi Daya Menggunakan Metode Binary Particle Swarm Optimization (Bpso)', *REEC Journal Of Renewable Energy, Electronics And Control*, pp. 48–57. Available at: <https://doi.org/10.31284/j.JREEC.2024.v11i.>
- Rumsory, E. (2022) *Analisa Beban Tidak Seimbang Pada Saluran Distribusi 220/380 V Di Kota Fak - Fak Menggunakan Software ETAP Power Station*.
- Rusdjaja, T. (2014) *Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga*.
- Seniari, N.M., Fadli, M.N. and Ginarsa, I.M. (2020) *Analisis Rencana Pemasangan Transformator Sisipan Pada Saluran Transformator Distribusi Penyalang Pagutan (Studi Kasus: Transformator Distribusi Am097di Jalan Banda Seraya, Pagesangan, Kota Mataram)*.
- Suhadi and Wrahatnolo, T. (2008) *Teknik Distribusi Tenaga Listrik*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Sutawinaya, I.P., Teresna, I.W. and Setyacahyana P, F. (2014) 'Studi Analisis Penambahan Transformator Sisipan Untuk Menopang Beban Lebih Dan Drop Tegangan Pada Transformator Distribusi Ka 1516 Penyalang Buduk Menggunakan Simulasi Program Etap 7.0.', *JURNAL LOGIC*, 14, pp. 133–139.