

# TUGAS AKHIR

## ANALISIS PENGARUH BEBAN TAK SEIMBANG TERHADAP ARUS NETRAL DAN RUGI DAYA PADA TRAFO PT PLN (PERSERO) UPT BANDA ACEH GARDU INDUK ARUN

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

Disusun Oleh :

**M. FAUZAN ADITYA**

**2107220083**



**UMSU**

Unggul | Cerdas | Terpercaya

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

## HALAMAN PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan oleh:

Nama : M. Fauzan Aditya

NPM : 2107220083

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Beban Tak Seimbang Terhadap Arus Netral  
Dan Rugi Daya Pada Trafo PT PLN (Persero) UPT Banda  
Aceh Gardu Induk Arun

Bidang Ilmu : Sistem Kontrol

Telah Berhasil dipertahankan di hadapan tim penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik. Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Mengetahui dan menyetujui

Dosen Pembimbing

Dr. Elvy Sahnur Nasution S.T., M.Pd

Dosen Pembanding I

Ir. Abdul Aziz Hutasuhut M.M

Dosen Pembanding II

Benny Oktrialdi S.T,M.T

Program Studi Teknik Elektro



Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Surat yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : M. Fauzan Aditya

Tempat / Tanggal Lahir : Rantau / 23 Mei 2002

NPM : 2107220083

Fakultas : Teknik

Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan Sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan tugas akhir saya yang berjudul:

**“Analisis Pengaruh Beban Tak Seimbang Terhadap Arus Netral Dan Rugi Daya Pada Trafo PT PLN (Persero) UPT Banda Aceh Gardu Induk Arun”**

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

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

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

Medan, 26 Agustus 2025

Saya yang menyatakan,

  
M. Fauzan Aditya

## ABSTRAK

Tugas akhir ini membahas analisis pengaruh beban tidak seimbang terhadap arus netral dan rugi daya pada trafo daya di PT PLN (Persero) UPT Banda Aceh Gardu Induk Arun. Seiring meningkatnya kebutuhan adalah, beban puncak sering terjadi pada waktu-waktu tertentu, baik siang maupun malam hari. Kondisi ini menyebabkan ketidakseimbangan arus pada trafo yang berujung pada mengalirnya arus di penghantar netral. Aliran arus netral ini menimbulkan kerugian energi yang dikenal sebagai *losses*. Penelitian ini bertujuan menganalisis seberapa besar ketidakseimbangan beban memengaruhi arus, tegangan, daya, dan efisiensi trafo daya, serta menghitung besarnya rugi-rugi daya yang diakibatkan oleh kondisi tersebut. Metode yang digunakan adalah pengambilan data primer melalui observasi lapangan, yang kemudian dianalisis menggunakan perhitungan matematis. Data yang diambil mencakup arus fasa R, S, dan T pada dua trafo daya (Trafo 1 dan Trafo 2) selama siang dan malam hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua trafo mengalami kondisi beban tidak seimbang, dengan persentase ketidakseimbangan yang lebih tinggi pada Trafo 2, yaitu 13,33% pada siang hari dan 11,43% pada malam hari. Sebagai dampaknya, ditemukan adanya rugi-rugi daya akibat arus netral pada kedua trafo. Pada siang hari, *losses* di Trafo 1 mencapai 25,02 kW (0,042%), sementara di Trafo 2 sebesar 14,4552 kW (0,024%). Pada malam hari, *losses* di Trafo 1 adalah 4,0965 kW (0,007%), dan di Trafo 2 sebesar 12,974 kW (0,022%). Dengan demikian, ketidakseimbangan beban secara langsung berkorelasi dengan munculnya arus netral, yang pada akhirnya menyebabkan kerugian daya pada trafo.

**Kata kunci :** Beban Tidak Seimbang, Arus Netral, Trafo Daya, Rugi Daya (*Losses*), Efisiensi Trafo

## **ABSTRACT**

*This final project discusses the analysis of the effect of unbalanced loads on neutral current and power losses in power transformers at PT PLN (Persero) UPT Banda Aceh Arun Substation. As electricity demand increases, peak loads often occur at certain times, both during the day and at night. This condition causes current imbalance in the transformer, which results in current flowing in the neutral conductor. This neutral current flow causes energy losses known as losses. This study aims to analyze the extent to which load imbalance affects the current, voltage, power, and efficiency of power transformers, as well as to calculate the amount of power losses caused by these conditions. The method used is primary data collection through field observation, which is then analyzed using mathematical calculations. The data collected includes the R, S, and T phase currents in two power transformers (Transformer 1 and Transformer 2) during the day and night. The results of the study show that both transformers experience unbalanced load conditions, with a higher percentage of imbalance in Transformer 2, namely 13.33% during the day and 11.43% at night. As a result, power losses due to neutral currents were found in both transformers. During the day, losses in Transformer 1 reached 25.02 kW (0.042%), while in Transformer 2 they were 14.4552 kW (0.024%). At night, losses in Transformer 1 were 4.0965 kW (0.007%), and in Transformer 2 they were 12.974 kW (0.022%). Thus, load imbalance is directly correlated with the emergence of neutral current, which ultimately causes power losses in the transformer.*

**Keywords :** *Unbalanced Load, Neutral Current, Power Transformer, Power Losses, Transformer Efficiency*

## KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puji dan syukur kami panjatkan kepada Allah SWT, yang telah menetapkan segala sesuatu dengan sempurna, sehingga tiada sehelai daun pun yang jatuh tanpa izin-Nya. Alhamdulillah, atas rahmat dan petunjuk-Nya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul “ANALISIS PENGARUH BEBAN TAK SEIMBANG TERHADAP ARUS NETRAL DAN RUGI DAYA PADA TRAF0 PT PLN (PERSERO) UPT BANDA ACEH GARDU INDUK ARUN” sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan.

Dalam kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan, baik secara langsung maupun tidak langsung, selama proses penyusunan skripsi ini. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada :

1. Bapak Prof. Dr. H. Agussani, M.A.P, selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
2. Ayahanda Alm.Ridwan, Bapak Misman, Ibunda Latifah Hanum, serta Kakak Adek dan Abang yang senantiasa memberikan cinta, dukungan moral, dan materi tanpa henti. Terima kasih atas doa, nasihat, dan kasih sayang yang tiada habisnya.
3. Bapak Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T, selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Bapak Assoc. Prof. Ir. Ade Faisal, M.Sc., Ph.D, selaku Wakil Dekan I Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Bapak Affandi, S.T., M.T, selaku Wakil Dekan III Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Ibu Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd, selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara sekaligus Dosen Pembimbing yang dengan sabar telah membimbing, mengarahkan,

dan memberikan masukan berharga selama proses penyusunan tugas akhir ini.

7. Seluruh Bapak/Ibu Dosen Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, atas ilmu yang sangat bermanfaat selama masa perkuliahan.
8. Bapak/Ibu Staf Administrasi Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, atas dukungan administratif yang diberikan.
9. Teman-teman Teknik Elektro, yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan bantuan selama proses penyusunan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka terhadap kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan di masa mendatang. Harapan penulis, semoga laporan ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang teknik elektro, dan menjadi kontribusi kecil bagi perkembangan dunia teknik.

Medan, 26 Agustus 2025



M. Fauzan Aditya

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>i</b>
<b>SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR</b> .....	<b>ii</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>x</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Ruang Lingkup .....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Tinjauan Pustaka Relevan .....	5
2.2 Transformator.....	7
2.2.1 Pengertian Transformator.....	7
2.2.2 Prinsip Kerja Transformator .....	8
2.2.3 Konstruksi Bagian - Bagian Transformator Daya.....	9
2.2.4 Minyak Transformator .....	12
2.2.5 Sistem Tiga Fasa .....	13
2.2.6 <i>Losses</i> (rugi-rugi) Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral .....	14
2.2.7 Trafo Sistem Daya.....	15

2.2.8 Asal Mula Tegangan 220Volt .....	16
2.2.9 Keadaan Transformator Berbeban .....	16
2.2.10 Rangkaian Ekuivalen Trafo.....	17
2.3 Hukum Dasar .....	19
2.3.1 Hukum Induksi Faraday .....	19
2.3.2 Transformator Ideal.....	22
2.3.3 Efisiensi.....	23
2.3.4 Daya Pada Saluran Distribusi .....	24
2.3.5 Kualitas Daya .....	24
2.3.6 Susut Pada Sistem Distribusi .....	25
2.3.7 Rugi-Rugi Transmisi.....	26
2.4 Sifat – Sifat Listrik Yang Menentukan Kinerja Cairan Isolasi .....	28
2.4.1 Pendingin .....	28
2.5 Cos Phi Meter.....	29
2.6 Segitiga Daya .....	30
2.7 Harmonisa .....	31
2.8 Jenis Hubungan Pada Belitan Transformator Tiga Fasa.....	32
2.9 Sistem Distribusi Tenaga Listrik.....	36
2.10 Standart Beban Trafo .....	39
2.11 <i>Neutral Grounding Resistance</i> (NGR).....	40
2.12 Rangkaian <i>Neutral Grounding Resistance</i> (NGR).....	44
2.13 Gardu Induk .....	45
2.14 Saluran Transmisi .....	45
2.15 Tegangan Tiga Fasa .....	46
<b>BAB III.....</b>	<b>50</b>
<b>METODELOGI PENELITIAN.....</b>	<b>50</b>

3.1 Waktu dan Tempat .....	50
3.2 Bahan dan Alat .....	50
3.3 Prosedur Penelitian .....	50
3.4 Metode Pengumpulan Data .....	51
3.4.1 Data primer .....	51
3.4.2 Data Sekunder .....	51
3.5 Sumber Data .....	51
3.6 Alur Penelitian .....	52
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>53</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>55</b>
.....	55

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Rangkaian Dasar Transformator .....	9
Gambar 2. 2 Rangkaian 3 fasa terhubung Y-Y .....	13
Gambar 2. 3 Bentuk sumber terhubung delta menuju beban yang terhubung Y..	13
Gambar 2. 4 Bentuk rangkaian tiga fasa tidak seimbang.....	14
Gambar 2. 5 Keadaan Transformator Berbeban .....	16
Gambar 2. 6 Rangkaian Ekuivalen Trafo.....	17
Gambar 2. 7 Rangkaian Ekuivalen Trafo Disimplifikasi.....	17
Gambar 2. 8 Uji Rangkaian Tanpa Beban .....	18
Gambar 2. 9 Uji Hubung Singkat.....	19
Gambar 2. 10 Vektor Diagram Arus .....	21
Gambar 2. 11 Transformator Ideal.....	22
Gambar 2. 12 Segitiga Daya .....	31
Gambar 2. 13 Gelombang <i>Fundamental</i> .....	32
Gambar 2. 14 Trafo Hubung Bintang Bintang.....	32
Gambar 2. 15 Trafo Hubung Delta Delta.....	33
Gambar 2. 16 Trafo Hubung Bintang Delta.....	34
Gambar 2. 17 Trafo Hubung Delta Bintang.....	35
Gambar 2. 18 Trafo Hubung Zig-Zag.....	35
Gambar 2. 19 Sistem Saluran Distribusi <i>Radial</i> .....	37
Gambar 2. 20 Sistem Saluran Distribusi <i>Loop</i> .....	38
Gambar 2. 21 Bagian-bagian dari (NGR) .....	41
Gambar 2. 22 (NGR) Jenis Liquid .....	41
Gambar 2. 23 (NGR) Jenis Metal .....	42
Gambar 2. 24 Rangkaian <i>Neutral Grounding Resistance</i> .....	44
Gambar 2. 25 Saluran Transmisi Listrik .....	46
Gambar 2. 26 Tegangan Tiga Fasa .....	46
Gambar 2. 27 Vektor Tegangan (R,S,T).....	47
Gambar 2. 28 Tegangan R-N dan S-N .....	47
Gambar 2. 29 Segitiga Metode Phasor Diagram.....	48
Gambar 2. 30 Sudut $60^\circ$ .....	48
Gambar 2. 31 Hasil Akhir Antar Fasa .....	49

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Saat ini, kebutuhan akan tenaga listrik menjadi hal yang sangat penting, baik untuk kehidupan sehari-hari maupun untuk kebutuhan industri. Hal ini disebabkan oleh kemudahan dalam transportasi tenaga listrik atau konversinya menjadi bentuk energi lain dengan menggunakan transformator. Penyediaan tenaga listrik yang stabil dan berkelanjutan adalah syarat mutlak yang harus dipenuhi oleh PT. PLN untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik.

Transformator (trafo) adalah komponen penting dalam sistem distribusi listrik yang berfungsi untuk mengubah tegangan listrik dari satu tingkat ke tingkat lainnya. Fungsi utama transformator adalah untuk meningkatkan (*step-up*) atau menurunkan (*step-down*) tegangan, sehingga memungkinkan pengiriman energi listrik secara efisien dari pembangkit listrik kepada konsumen.

Pentingnya transformator terletak pada kemampuannya untuk mengurangi kerugian energi selama proses transmisi. Dengan meningkatkan tegangan, arus yang mengalir dalam jaringan distribusi dapat diminimalkan, sehingga mengurangi resistansi dan kerugian daya akibat panas. Selain itu, transformator juga berkontribusi pada stabilitas dan keandalan sistem kelistrikan, memastikan pasokan listrik yang konsisten dan berkualitas kepada pengguna.

Dalam penyaluran tenaga listrik, sering kali terjadi penggunaan oleh konsumen secara bersamaan pada waktu tertentu, serta adanya penambahan daya listrik oleh konsumen. Hal ini mengakibatkan peningkatan permintaan pasokan tenaga listrik, yang dikenal sebagai beban puncak (*peak supplies*). Beban puncak dapat terjadi baik pada malam hari maupun siang hari pada waktu-waktu tertentu.

Ketidakseimbangan arus pada trafo terjadi akibat beban yang tidak merata pada tiap fasa, yaitu fasa R, S, dan T. Ketidakseimbangan ini menyebabkan mengalirnya arus pada penghantar netral transformator. Kondisi ini sering kali disebabkan oleh perbedaan beban yang signifikan antar fasa ataupun gangguan pada jaringan distribusi listrik.

Ketidakseimbangan beban pada trafo, yaitu beban yang tidak terdistribusi secara merata di setiap fasa, dapat menyebabkan beberapa bahaya, seperti peningkatan rugi-rugi, penurunan kinerja trafo, dan bahkan kerusakan.

Sama seperti *transformer* dalam sistem Great Barrington, transformator apa pun yang mengambil tegangan dari sirkuit distribusi primer dan *step down* atau mengurangnya ke sirkuit distribusi sekunder atau sirkuit layanan konsumen adalah transformator distribusi. Meskipun banyak standar industri cenderung membatasi definisi ini dengan peringkat kVA (mis., 5 hingga 500 kVA), trafo distribusi dapat memiliki peringkat yang lebih rendah dan dapat memiliki peringkat 5.000 kVA atau bahkan lebih tinggi (Rumakat & Fauziah, 2021).

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral pada trafo daya?
2. Bagaimana pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap *losses* pada trafo daya ?

## 1.3 Ruang Lingkup

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa batasan yang perlu diperjelas, yaitu:

1. Untuk menganalisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral.
2. Pengukuran ini hanya dilakukan 1 hari sehingga hari-hari yang lain tidak diolah datanya dan pendekatan memilih  $I_R, I_S, I_T$  yaitu arus tertinggi siang dan malam.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis ketidakseimbangan beban pada transformator daya terhadap arus, tegangan, daya dan efisiensi.
2. Menganalisis seberapa besar rugi-rugi daya dan efisiensi yang terjadi akibat ketidakseimbangan beban pada transformator daya.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini dapat dipergunakan sebagai acuan dalam perencanaan dan pengoperasian transformator daya dan suhu isolasi serta transformator daya untuk mengatasi gangguan dan kerusakan pada transformator daya.
2. Dengan mengetahui rugi-rugi daya diharapkan menjadi acuan dan pelajaran untuk saya dan PT PLN (PERSERO) UPT BANDA ACEH GARDU INDUK ARUN untuk lebih baik lagi.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Dalam memperoleh suatu pemahaman yang lebih dalam secara logis dan sistematis dalam hal ini melakukan pengumpulan materi dan literatur secara teratur dan sesuai metode penelitian, maka materi dalam penelitian ini akan dikelompokkan ke dalam beberapa sub bab yaitu sebagai berikut :

### a) BAB I ( PENDAHULUAN )

Bab ini bertindak sebagai pengantar yang menyajikan gambaran umum tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, serta sistematika penulisan dalam penelitian ini.

### b) BAB II ( TINJAUAN PUSTAKA )

Bab ini memuat pembahasan teori dan referensi ilmiah yang berkaitan dengan topik penelitian, serta menjelaskan landasan ilmiah yang menjadi dasar penelitian. Dalam tinjauan pustaka, peneliti akan mengkaji berbagai literatur dari berbagai sumber untuk memperkuat argumen dan pemahaman mengenai masalah yang dibahas.

### c) BAB III ( METODOLOGI PENELITIAN )

Bab ini menguraikan metode yang diterapkan dalam penelitian, termasuk tahapan yang diambil, untuk mencapai tujuan penelitian. Metodologi penelitian meliputi pendekatan, teknik dan prosedur yang digunakan dalam proses pengumpulan analisis data, sehingga hasil yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

d) BAB IV ( HASIL DAN PEMBAHASAN )

Bab ini menyajikan hasil-hasil penelitian yang diperoleh melalui analisis data, kemudian mengulas temuan tersebut secara mendetail untuk menjawab rumusan masalah dan mencapai tujuan penelitian.

e) BAB V ( PENUTUP )

Bab ini adalah bagian penutup dari skripsi yang menyajikan kesimpulan dan rekomendasi berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan. Selain itu, bab ini juga merangkum temuan utama dan memberikan saran untuk penelitian di masa depan atau penerapan praktis.

f) DAFTAR PUSTAKA

Daftar sumber referensi yang dikumpulkan dan dipergunakan sebagai literatur pada penelitian ini.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka Relevan**

Keberhasilan kinerja suatu sistem atau bagian dari jaringan listrik memiliki peran yang sangat penting. Untuk mengevaluasi keandalan sistem, perlu dilakukan analisis efisiensi kinerja sistem selama periode waktu tertentu.

Hasil penelitian dari [2] mengenai analisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan rugi daya pada trafo daya PLN gardu induk bulukumba. Hasil penelitian menunjukkan adanya Ketidakseimbangan beban pada suatu sistem distribusi tenaga listrik selalu terjadi dan penyebab ketidakseimbangan tersebut adalah pada beban-beban satu fasa pada pelanggan jaringan tegangan menengah. Akibat ketidakseimbangan beban tersebut muncullah arus di netral trafo. Arus yang mengalir di netral trafo ini menyebabkan terjadinya *losses* (rugi-rugi), yaitu *losses* akibat adanya arus netral pada penghantar netral trafo dan *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah. Setelah dianalisa, diperoleh bahwa terjadi ketidakseimbangan beban pada siang hari berkisar 2,67%, arus netral yang muncul 2,38 A dan presentase *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah adalah 0,0011%.

Selain itu, penelitian oleh [3] mengenai Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan *Losses* Pada Trafo Distribusi 200 KVA. Hasil penelitian menunjukkan adanya Ketidakseimbangan beban sering terjadi pada suatu jaringan listrik yang menjadi permasalahan terus-menerus, terutama pada suatu sistem distribusi tenaga listrik selalu terjadi dan penyebab ketidakseimbangan tersebut adalah pada beban-beban satu fasa pada pelanggan jaringan tegangan rendah. Akibat ketidakseimbangan beban tersebut timbullah arus di netral trafo. Tujuan Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan data akurat sebagai bahan menganalisa penyebab ketidakseimbangan pada beban. Metode penelitian yang dilakukan dengan proses data pengukuran yang dilakukan pada trafo distribusi di Jalan Pasar 2 Barat Marelán. Berdasarkan data opservasi lapangan dengan cara pengukuran didapatkan adanya arus yang mengalir di netral trafo sehingga menyebabkan terjadinya *losses* (rugi-rugi), yaitu *losses* akibat adanya arus netral pada penghantar netral trafo dan *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah. Hasil penelitian

ini diperoleh setelah dianalisa, diperoleh bahwa bila terjadi ketidakseimbangan beban yang besar, maka arus netral yang muncul juga besar, dan *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah semakin besar pula.

Persentase ketidakseimbangan beban pada Trafo 200 KVA saat pengukuran siang hari sebesar 10%, sedangkan pada malam hari 12,67%. Adapun besarnya *losses* ketidakseimbangan pada trafo 200 KVA yang diakibatkan adanya arus netral dengan perhitungan data disiang hari yaitu 8,38 KW, malam harinya 10,38 KW. Sedangkan besarnya *losses* ketidakseimbangan pada trafo 200 KVA yang diakibatkan adanya arus netral yang mengalir ketanah dari data siang hari yaitu 15,32 KW, malam harinya 13,45 KW.

Pada penelitian [4] mengenai analisis pengaruh beban tidak seimbang terhadap kualitas daya pada jaringan distribusi radial di area atambua kabupaten belu. Hasil penelitian menunjukkan adanya Perkembangan beban listrik di wilayah kota Atambua sudah cukup tinggi. Kondisi demikian, mendorong untuk dilakukan pengaturan beban yang lebih baik agar dapat mengoptimalkan mutu kualitas daya, oleh karena itu perlu dilakukan pemerataan beban disetiap fasa agar beban seimbang. Ketidakseimbangan beban suatu sistem distribusi tenaga listrik selalu terjadi. Pembagian beban yang dilakukan di saluran distribusi sekunder wilayah kota Atambua cenderung kurang memperhatikan proses pembagian beban antara ketiga fasa. Sebelum melakukan pemerataan beban pada saluran distribusi sekunder di Gardu trafo yang ada di wilayah kota Atambua maka penulis melakukan suatu pengamatan dan analisa beban menyangkut data yang diperoleh. Berdasarkan data hasil pengamatan diketahui bahwa di wilayah kota Atambua mengalami ketidakseimbangan beban. Ketidakseimbangan beban menimbulkan rugi-rugi daya yang cukup besar akibatnya menurunkan mutu kualitas daya. Akan tetapi setelah melakukan simulasi penyeimbangan beban di wilayah kota Atambua dengan menggunakan *software* ETAP *power station* rugi-rugi daya mengalami penurunan baik dari segi *Plosses* maupun *Qlosses*.

Kemudian pada penelitian [5] Mengenai Analisis Pengaruh Beban Tak Seimbang Terhadap Arus Netral Pada Trafo IV GI Sukamerindu Bengkulu. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa Transformator IV adalah salah satu transformator distribusi 20 kV yang ditemukan di Gardu Induk Sukamerindu

Bengkulu (GI). Transformator ini memiliki daya terukur sebesar 30 MVA. Dalam transformator distribusi, penyeimbangan beban antar fase sangat diperlukan. Jika beban tidak seimbang antara fase-fase, arus akan mengalir di kabel netral. Dalam penelitian ini, efek beban tak seimbang terhadap arus netral pada transformator IV Sukamerindu Bengkulu dianalisis. Beban dianalisis setiap jam sepanjang hari dengan mengamati jumlah arus dan tegangan di setiap fase. Dari hasil analisis, ditemukan bahwa nilai rugi arus netral tertinggi adalah 1306,25 watt atau 1,30 kW, dan yang terendah adalah 0,724 kW, dengan rata-rata rugi arus netral yang terjadi pada transformator unit IV Sukamerindu sebesar 639 watt.

## **2.2 Transformator**

### **2.2.1 Pengertian Transformator**

Transformator atau lebih dikenal dengan nama “*transformer*” atau pada satu *level* tegangan lain berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik tanpa merubah frekuensinya. Transformator biasa digunakan untuk mentransformasikan tegangan (menaikkan atau menurunkan tegangan AC). Selain itu, transformator juga dapat digunakan untuk sampling tegangan, sampling arus, dan juga mentransformasi impedansi. Transformator berdiri dari dua atau lebih kumparan yang membungkus inti besi feromagnetik. Kumparan-kumparan tersebut biasanya satu sama lain tidak dihubungkan secara langsung. Kumparan yang satu dihubungkan dengan sumber listrik AC (kumparan primer) dan kumparan yang lain menyuplai listrik ke beban (kumparan sekunder). “trafo” sejatinya adalah suatu peralatan listrik yang mengubah daya listrik AC.

Transformator daya adalah jenis transformator yang digunakan untuk meningkatkan nilai tegangan listrik dari *generator* listrik. Penempatannya di gardu induk. Tegangan listrik yang diperbesar nilainya kemudian disalurkan ke saluran transmisi tenaga listrik. Transformator daya mengubah tegangan menengah menjadi tegangan tinggi. Perubahan tegangannya juga dapat dari tegangan menengah menjadi tegangan ekstra tinggi.

Seperti yang diungkapkan oleh Linsley (2004), peningkatan kapasitas daya suatu transformator menimbulkan tantangan dalam mengelola panas yang dihasilkan oleh inti transformator dengan cara yang aman dan efektif. Salah satu solusi yang umum diterapkan adalah dengan menempatkan transformator dalam

sebuah wadah yang diisi dengan bahan isolasi minyak yang sepenuhnya melingkupi inti dan belitan. Minyak ini memiliki dua fungsi utama, yaitu sebagai pendingin dan sebagai media isolasi untuk inti transformator.

Peningkatan kapasitas daya transformator dilakukan untuk memenuhi kebutuhan beban puncak, sehingga penting untuk memperhatikan keandalan minyak trafo. Hal ini bertujuan untuk mencegah terjadinya panas berlebihan yang disebabkan oleh arus yang mengalir pada inti transformator.

Penggunaan yang sangat sederhana dan andal itu merupakan salah satu yang sebab penting bahwa arus bolak-balik sangat banyak dipergunakan untuk membangkitkan dan penyaluran tenaga listrik.

Transformator dapat dibagi menurut fungsi/pemakaian seperti :

- a. Transformator Mesin (Pembangkit)
- b. Transformator Gardu Induk
- c. Transformator Distribusi

Penggunaan transformator dalam sistem penyaluran tenaga listrik dapat dibedakan menjadi tiga kategori:

- a. Transformator penaik tegangan (*step up*), yang juga dikenal sebagai transformator daya, berfungsi untuk meningkatkan tegangan dari pembangkit menjadi tingkat tegangan untuk transmisi.
- b. Transformator penurun tegangan (*step down*), yang sering disebut sebagai transformator distribusi, digunakan untuk menurunkan tegangan dari tingkat transmisi menjadi tegangan yang sesuai untuk distribusi.
- c. Transformator instrumen, yang terdiri dari transformator tegangan dan transformator arus, digunakan untuk menurunkan tegangan dan arus agar dapat diukur dengan meter pengukuran.

### **2.2.2 Prinsip Kerja Transformator**

Transformator adalah perangkat listrik statis yang digunakan untuk mentransfer daya dari satu rangkaian ke rangkaian lainnya dengan mengubah tegangan, tanpa mengubah frekuensi. Dalam bentuk paling sederhana, transformator terdiri dari dua kumparan dan satu induktansi mutual. Kumparan primer berfungsi sebagai penerima daya, sedangkan kumparan sekunder terhubung ke beban. Kedua kumparan tersebut dililitkan pada sebuah inti yang terbuat dari

material magnetik berlaminasi.

Landasan fisik transformator adalah induktansi mutual (timbang balik) antara kedua rangkaian yang dihubungkan oleh suatu fluks magnetik bersama yang melewati suatu jalur dengan reluktansi rendah. Kedua kumparan memiliki induktansi mutual yang tinggi. Jika satu kumparan disambung pada suatu sumber tegangan bolak-balik, suatu fluks bolak-balik terjadi di dalam inti berlaminasi, yang sebagian besar akan mengait pada kumparan lainnya, dan di dalamnya akan terinduksi suatu gaya-gerak-listrik (ggl) sesuai dengan hukum-hukum induksi elektromagnetik Faraday, yaitu:

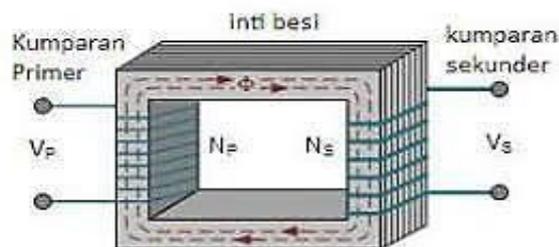
$$e = M \, di/dt$$

keterangan :

$e$  = Gaya-gerak-listrik yang diinduksikan

$M$  = Induktansi mutual

$di/dt$  = Besarnya perubahan arus tiap satuan waktu (A/s)



Gambar 2. 1 Rangkaian Dasar Transformator

### 2.2.3 Konstruksi Bagian - Bagian Transformator Daya

Konstruksi transformator terdiri dari dua bagian utama, yaitu peralatan utama dan peralatan bantu.

Peralatan Utama Transformator Daya:

1. Kumparan Trafo: Terdiri dari beberapa lilitan kawat tembaga yang dilapisi dengan bahan isolasi (karton, pertinax) untuk mengisolasi baik terhadap inti besi maupun kumparan lain.
2. Inti Besi: Dibuat dari lempengan-lempengan feromagnetik tipis yang berguna untuk mempermudah jalan fluksi yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan.

3. Minyak Trafo: Sebagian besar trafo tenaga kumparan-kumparan dan intinya direndam dalam minyak trafo, terutama trafo-trafo tenaga yang berkapasitas besar.
4. *Bushing*: Sebuah konduktor (*porcelain*) yang menghubungkan kumparan transformator dengan jaringan luar.
5. Tangki dan Konservator (khusus untuk transformator basah): Pada umumnya bagian-bagian dari trafo yang terendam minyak trafo ditempatkan didalam tangki baja. Tangki trafo-trafo distribusi umumnya dilengkapi dengan sirip-sirip pendingin (*cooling fin*) yang berfungsi memperluas permukaan dinding tangki, sehingga penyaluran panas minyak pada saat konveksi menjadi semakin baik dan efektif untuk menampung pemuaian minyak trafo.

Peralatan Bantu Transformator:

1. Peralatan Pendingin: Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga.
2. *Tap Changer*: Suatu alat yang berfungsi untuk merubah kedudukan tap (sadapan) dengan maksud mendapatkan tegangan keluaran yang stabil walaupun beban berubah – ubah.
3. Peralatan proteksi yaitu peralatan yang mengamankan trafo terhadap bahaya fisis, elektris maupun kimiawi.

Peralatan proteksi transformator meliputi berbagai perangkat yang dirancang untuk mendeteksi dan mengamankan transformator dari berbagai gangguan. Berikut adalah beberapa peralatan proteksi yang umum digunakan:

- a) Relai *Buchols*: Peralatan relai yang dapat mendeteksi dan mengamankan terhadap gangguan di dalam transformator yang menimbulkan gas.
- b) Relai Tekanan Lebih: Peralatan relai yang dapat mendeteksi gangguan pada transformator ketika terjadi kenaikan tekanan gas secara tiba-tiba dan langsung mentripkan *circuit breaker* (CB) pada sisi *upstream*.
- c) Relai Diferensial: Relai yang dapat mendeteksi gangguan pada transformator apabila terjadi flashover antara kumparan dengan kumparan, kumparan dengan tangki, atau belitan dengan belitan di dalam kumparan.
- d) Relai Beban Lebih: Relai ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap beban yang berlebihan dengan menggunakan sirkuit simulator yang

dapat mendeteksi lilitan transformator. Apabila terjadi gangguan, relai ini akan mengeluarkan alarm pada tahap pertama dan kemudian akan menjatuhkan pemutus (PMT).

- e) Relai Arus Lebih: Relai ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan hubungan singkat antara fase di dalam maupun di luar daerah pengaman transformator. Relai ini diharapkan memiliki sifat komplementer dengan relai beban lebih.
- f) Relai Fluks Lebih: Relai ini berfungsi untuk mengamankan transformator dengan mendeteksi besaran fluks atau perbandingan tegangan dan frekuensi.
- g) Relai Tangki Tanah: Relai ini berfungsi untuk mengamankan transformator jika terjadi hubungan singkat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada transformator.
- h) Relai Gangguan Tanah Terbatas: Relai ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan tanah di dalam daerah pengaman, khususnya untuk gangguan di dekat netral yang tidak dapat dirasakan oleh relai diferensial.
- i) Relai Termis: Relai ini berfungsi untuk mengamankan transformator dari kerusakan isolasi kumparan akibat adanya panas berlebih yang ditimbulkan oleh arus lebih.
- j) Peralatan Pernapasan (*Dehydrating Breather*): Ventilasi udara yang berupa saringan silika gel yang akan menyerap uap air.
- k) Indikator-Indikator: Berbagai indikator yang digunakan untuk memantau kondisi transformator.
- l) *Thermometer / Temperature Gauge*: Alat ini berfungsi untuk mengukur tingkat panas dari transformator, baik panas kumparan primer dan sekunder maupun minyak trafo.
- m) Permukaan Minyak / *Level Gauge*: Alat ini berfungsi untuk menunjukkan tinggi permukaan minyak yang ada pada *konservator*.

Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, diperlukan indikator yang meliputi:

- a. Indikator suhu minyak
- b. Indikator permukaan minyak

- c. Indikator sistem pendingin
- d. Indikator kedudukan tap

#### 2.2.4 Minyak Transformator

Sebagian besar kumparan – kumparan dan inti trafo tenaga direndam dalam minyak trafo, terutama trafo tenaga yang berkapasitas besar karena minyak trafo mempunyai sifat sebagai isolasi dan media pemindah. Sehingga minyak trafo tersebut berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Di dalam sebuah transformator terdapat dua komponen yang secara aktif “membangkitkan” energi panas, yaitu besi (inti) tembaga (kumparan). Bila energi panas tidak disalurkan melalui suatu sistem pendingin akan mengakibatkan besi maupun tembaga akan mencapai suhu yang tinggi, yang akan merusak nilai isolasinya.[2]

Minyak trafo sebagai bahan isolasi sekaligus media penghantar panas dari bagian yang panas (belitan dan inti) ke dinding tangki atau radiator pendingin memiliki karakteristik sebagai berikut:

- a) Berat jenis (*Specific Gravity*): 0,85 sampai 0,90 pada suhu 13,5°C.
- b) Kekentalan (*Viscosity*): Cukup rendah untuk memperlancar sirkulasi dari bagian yang panas ke bagian yang dingin, yaitu 100 sampai 110 Saybolt *seconds* pada 40°C.
- c) Titik didih: Tidak kurang dari 135°C.
- d) Titik beku: Tidak lebih dari -45°C.
- e) Tegangan tembus: Tidak kurang dari 30 kV/2,5 mm atau 120 kV/1 cm.
- f) Koefisien muai: 0,00065/1°C.
- g) Titik api (*Flash Point*): 180°C sampai 190°C.
- h) Titik nyala (*Burning Point*): 205°C.
- i) Kelembaban terhadap uap air (*Moisture*): Harus dijaga agar tetap rendah untuk menjaga kualitas minyak trafo.

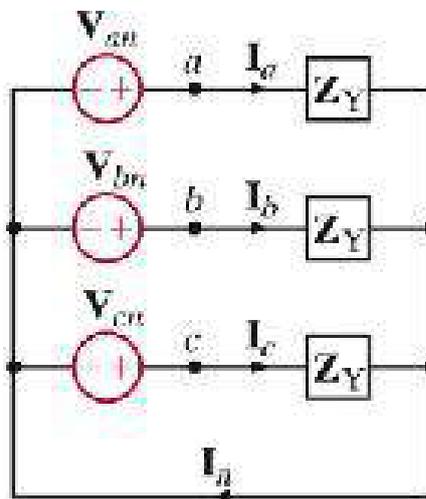
Karakteristik ini sangat penting untuk memastikan kinerja yang aman dan efisien dari transformator selama operasinya.

### 2.2.5 Sistem Tiga Fasa

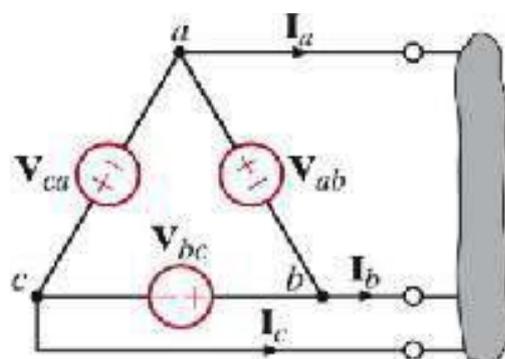
Sistem tiga fasa memiliki 4 bentuk berdasarkan bentuk belitan kawat dari sisi sumber dan bebannya. Bentuk rangkaian tiga fasa tersebut yaitu YY,  $\Delta$ -Y, Y- $\Delta$  dan  $\Delta$  -  $\Delta$  Untuk menganalisis arus, tegangan dan daya dalam *system* yang seimbang maka dapat digunakan persamaan-persamaan (1) sampai dengan persamaan (14). Dalam pembahasan ini hanya akan dibahas mengenai *system* tiga fasa yang terhubung Y-Y dan  $\Delta$ -Y [5].

#### 1.) *System* 3 fasa terhubung Y-Y

Bentuk rangkaian 3 fasa terhubung Y-Y dapat dilihat pada Gambar 2.2



Gambar 2. 2 Rangkaian 3 fasa terhubung Y-Y



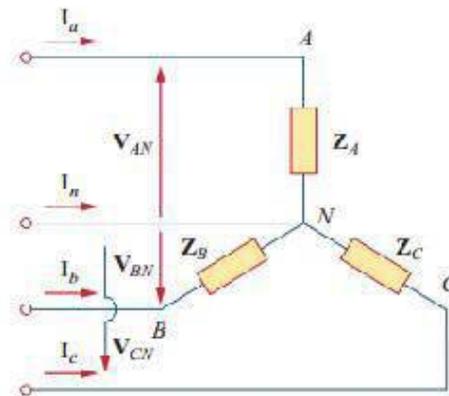
Gambar 2. 3 Bentuk sumber terhubung delta menuju beban yang terhubung Y

## 2.) System 3 Fasa Tak Seimbang

Suatu sistem tiga fasa dikatakan tidak seimbang apabila :

1. Sumber tegangannya tidak sama nilainya
2. perbedaan sudut fasa tidak sama (beda fasa tidak  $120^\circ$ )
3. Impedansi beban tidak sama

Untuk menganalisis beban pada *system* tidak seimbang maka dapat dilihat pada Gambar 2.4. Pada *system* tiga fasa tidak seimbang, besar arus pada tiap kawatnya harus dihitung perfasanya.



Gambar 2. 4 Bentuk rangkaian tiga fasa tidak seimbang

### 2.2.6 Losses (rugi-rugi) Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral

Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, S, dan T) mengalirlah arus dinetral trafo. Toleransi rugi-rugi daya pada trafo yang diizinkan oleh PLN umumnya adalah 5% untuk jaringan menengah, seperti yang disebutkan dalam SPLN No. 72 Tahun 1987. Rugi-rugi daya ini mengacu pada energi yang hilang selama proses transmisi dan distribusi listrik. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan *losses* (rugi-rugi). *Losses* pada penghantar netral trafo ini dapat dirumuskan melalui persamaan:

$$P_N = I_N^2 R_N \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

$P_N$  : *losses* pada penghantar netral trafo (Watt)

- $I_N$  : arus yang mengalir pada netral trafo (A)  
 $R_N$  : tahanan penghantar netral trafo ( $\Omega$ )

Sedangkan *losses* yang diakibatkan karena arus netral yang mengalir ketanah (*ground*) dapat dihitung melalui persamaan:

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana :

- $P_G$  : *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah (Watt)  
 $I_G$  : arus netral yang mengalir ke tanah (A)  
 $R_G$  : tahanan pembumian netral trafo ( $\Omega$ )

### 2.2.7 Trafo Sistem Daya

Trafo sering digunakan untuk sistem distribusi dan transmisi. Kelas ini memiliki daya atau volt-ampere dengan rating tinggi dan rating tegangan kontinyu yang besar. Trafo tenaga mempunyai inti dan kumparan yang dimasukkan dalam baja yang kemudian diisi minyak Trafo. Minyak digunakan untuk mendinginkan bagian-bagian yang mengalirkan arus yang menjadi panas selama operasi dan mengisolasi belitan-belitan dan kumparan [6] Batas toleransi rugi daya trafo daya pada jaringan PLN, khususnya untuk transformator distribusi, umumnya mengacu pada batasan rugi daya yang diizinkan dalam proses transformasi daya dari tegangan tinggi ke tegangan rendah. PLN (Perusahaan Listrik Negara) memiliki standar tersendiri, namun secara umum, batasan ini berkaitan dengan efisiensi trafo dan kualitas penyaluran daya. PLN memiliki Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) yang mengatur batasan tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi. SPLN No.1 tahun 1978 mengatur batas tegangan pelayanan, yaitu maksimum 5% (231 Volt) dan minimum 10% (198 Volt) dari tegangan nominal 220 Volt. Jika pembebanan trafo melebihi 80%, trafo dianggap mengalami beban lebih (*overload*).

### 2.2.8 Asal Mula Tegangan 220Volt

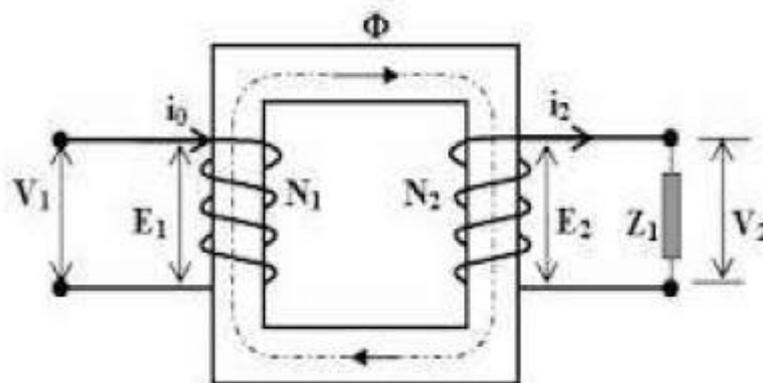
Biasanya digunakan di Indonesia dan banyak negara lainnya sebagai tegangan rumah tangga 1 fasa, berasal dari sistem 3 fasa dengan konfigurasi:

220 V = tegangan antara fasa dan netral (*V-phase to neutral*) ini berasal dari sistem 3 fasa 380 V (tegangan antar fasa), karena:

$$V_{\text{fasa}} = \frac{V_{\text{line}}}{\sqrt{3}} = \frac{380 \text{ V}}{\sqrt{3}} \approx 220 \text{ V}$$

### 2.2.9 Keadaan Transformator Berbeban

Jika ada arus bolak-balik yang mengalir melalui belitan sekunder, maka transformator dikatakan membawa beban. Arus sekunder dari transformator ini cenderung memagnetisasi rangkaian pusat dalam arah yang berlawanan dengan efek magnetisasi arus penguat primer. Jika penguatan arus pada belitan sisi primer diabaikan untuk mempertahankan fluks konstan pada rangkaian magnet, maka daya magnetisasi belitan primer relatif terhadap daya magnetisasi sisi sekunder akan sama dengan gaya magnetisasi arus beban atau arus belitan sisi primer sama dengan arus belitan sisi sekunder.

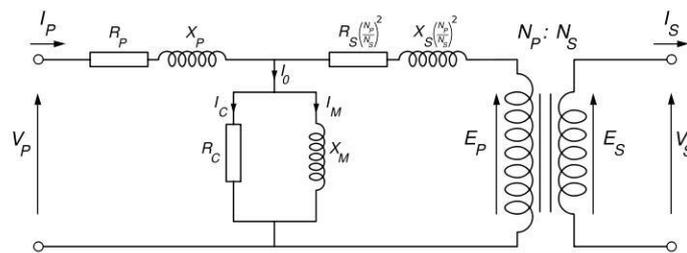


Gambar 2. 5 Keadaan Transformator Berbeban

Arus beban  $I_2$  ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) sebesar  $N_2 I_2$  yang cenderung berlawanan arah dengan fluks timbal balik ( $\Phi$ ) yang sudah ada akibat arus elektromagnetik tersebut. Agar fluks timbal balik tidak berubah nilainya, maka arus  $I_2$  harus mengalir pada kumparan primer, berlawanan arah dengan fluks yang ditimbulkan oleh arus beban  $I_2$  hingga arus total yang mengalir pada kumparan primer [7].

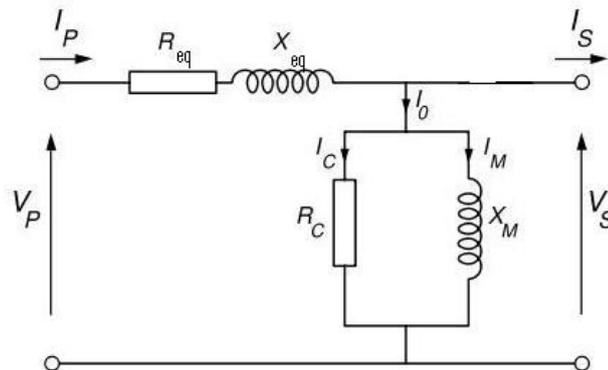
### 2.2.10 Rangkaian Ekuivalen Trafo

Namun, pada praktiknya daya masukan tidak pernah sepenuhnya sama dengan daya keluaran. Hal ini disebabkan adanya rugi-rugi yang terjadi pada inti besi dan lilitan transformator. Rugi-rugi tersebut meliputi rugi histeresis, rugi arus *Eddy*, rugi akibat resistansi belitan, serta rugi akibat fluks bocor. Berdasarkan fenomena tersebut, transformator dapat dimodelkan menggunakan rangkaian ekuivalen seperti ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 2. 6 Rangkaian Ekuivalen Trafo

Disimplifikasi menjadi :



Gambar 2. 7 Rangkaian Ekuivalen Trafo Disimplifikasi

Dimana,

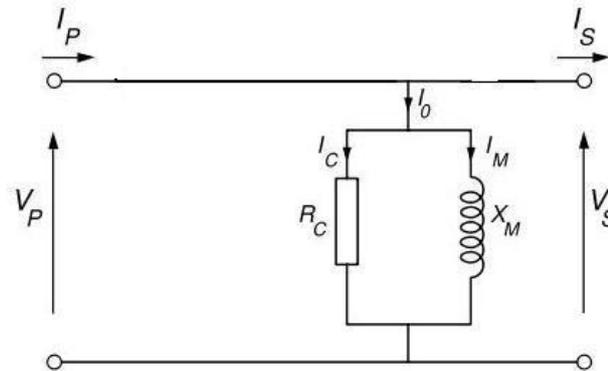
$$R_{eq} = R_p + (N_p/N_s)^2 \cdot R_s$$

$$X_{eq} = X_p + (N_p/N_s)^2 \cdot X_s$$

Setelah memahami rangkaian ekuivalen transformator, nilai  $R_{eq}$ ,  $X_{eq}$ ,  $R_c$ , dan  $X_m$  dapat ditentukan melalui pengujian tanpa beban dan pengujian hubung singkat. Parameter yang diukur pada pengujian ini meliputi daya (Watt), tegangan (Volt), dan arus (Ampere) pada sisi primer transformator.

### A. Uji Rangkaian Tanpa Beban

Dari pengujian ini, kita mendapatkan nilai  $R_c$  dan  $X_m$ . Nilai  $R_c$  dan  $X_m$  jauh lebih besar dibandingkan  $R_{eq}$  dan  $X_{eq}$ . Karena drop tegangan lebih signifikan terjadi di  $R_c$  dan  $X_m$ .



Gambar 2. 8 Uji Rangkaian Tanpa Beban

Yang pertama kali kita hitung adalah  $[Y_{cm}]$  dan Power Factor dari data yang diambil.

$$Y_{cm} = I_{oc}/V_{oc}$$

$$PF = \cos(\pi) = P_{oc}/(V_{oc}.I_{oc})$$

Dimana,

$$Y_{cm} = (1 / R_c) + j (1 / X_m)$$

$$[Y_{cm}] \cos(\pi) + j [Y_{cm}] \sin(\pi)$$

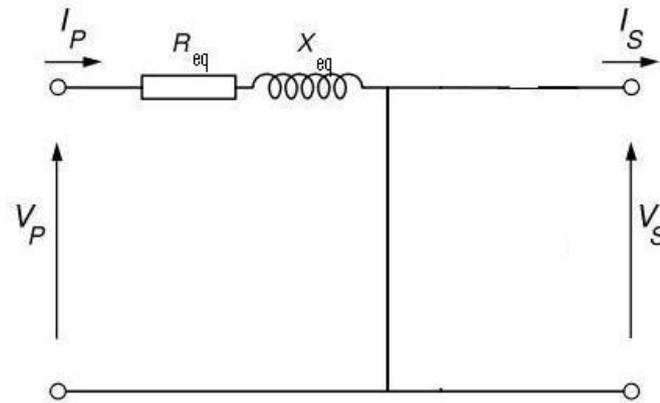
Sehingga didapat,

$$R_c = 1 / ([Y_{cm}] \cos(\pi))$$

$$X_m = 1 / ([Y_{cm}] \sin(\pi))$$

### B. Uji Hubung Singkat

Tegangan pada sisi sekunder saat pengujian hubung singkat relatif kecil, sehingga penurunan tegangan pada  $R_c$  maupun  $X_m$  sangat kecil dan dapat diabaikan. Dengan demikian, tegangan yang terukur dapat dianggap sebagai tegangan pada  $Z_{eq}$ . Kondisi ini dapat dijelaskan melalui rangkaian ekivalen transformator pada saat pengujian hubung singkat seperti ditunjukkan berikut:



Gambar 2. 9 Uji Hubung Singkat

Pertama-tama kita hitung terlebih dahulu  $[Z_{eq}]$  dan PF.

$$Z_{eq} = V_{sc} / I_{sc}$$

$$PF = \cos(\pi) = P_{sc} / (V_{sc} \cdot I_{sc})$$

Dimana,

$$Z_{eq} = R_{eq} + j X_{eq}$$

$$Z_{eq} \cos(\pi) + j Z_{eq} \sin(\pi)$$

Sehingga didapat,

$$R_{eq} = Z_{eq} \cos(\pi)$$

$$X_{eq} = Z_{eq} \sin(\pi)$$

## 2.3 Hukum Dasar

### 2.3.1 Hukum Induksi Faraday

Berdasarkan hukum Faraday, yang menyatakan bahwa integral garis dari gaya gerak listrik (ggl) melalui garis lengkung yang tertutup adalah berbanding lurus dengan perubahan fluks magnetik yang dilingkari oleh garis lengkung tersebut. Dengan kata lain, perubahan fluks magnetik yang melalui suatu luasan yang dibatasi oleh garis lengkung akan menghasilkan arus induksi.

Hukum Faraday yang menyatakan magnitude dari electromotive force (emf) proporsional terhadap perubahan fluks terhubung dan hukum Lenz yang menyatakan arah dari emf berlawanan dengan arah fluks sebagai reaksi perlawanan dari perubahan fluks tersebut.[8]

Jika arah yang dianggap positif untuk integral garis gaya listrik ditentukan, maka perbandingan lurus tersebut akan memiliki tanda negatif. Hal ini mencerminkan bahwa arah arus induksi yang dihasilkan berlawanan dengan arah

perubahan fluks magnetik, sesuai dengan hukum Lenz, yang menyatakan bahwa arus induksi akan mengalir sedemikian rupa sehingga menghasilkan medan magnet yang menentang perubahan fluks yang menyebabkannya.

Daya transformator bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (*primer*) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

S : Daya transformator (kVA)

V : Tegangan sisi primer trafo (kV)

I : Arus jala – jala (A)

Sehingga untuk menghitung arus beban penuh (*full load*) dapat menggunakan rumus :

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana :

$I_{FL}$  : Arus beban penuh (A)

S : Daya transformator (kVA)

V : Tegangan sisi sekunder trafo (kV)

Sebagai akibat dari ketidak seimbangan beban antara tiap – tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S, fasa T) mengalirlah arus dinetral trafo. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan *losses* (rugi – rugi).

*Losses* pada penghantar netral trafo ini dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_N = I_N \cdot R_N \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana :

$P_N$  : *Losses* penghantar netral trafo (watt)

$I_N$  : Arus pada netral trafo (A)

$R_N$  : Tahanan penghantar netral trafo (;)

Sedangkan *losses* yang diakibatkan karena arus netral yang mengalir ke tanah (*ground*) dapat dihitung dengan perumusan dibawah ini sebagai berikut :

$$P_G = I_G \cdot R_G \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana :

$P_G$  : *Losses* akibat arus netral mengalir ketanah (watt)

IG : Arus netral yang mengalir ketanah (A)

RG : Tahanan pembumian netral trafo ( $\Omega$ )

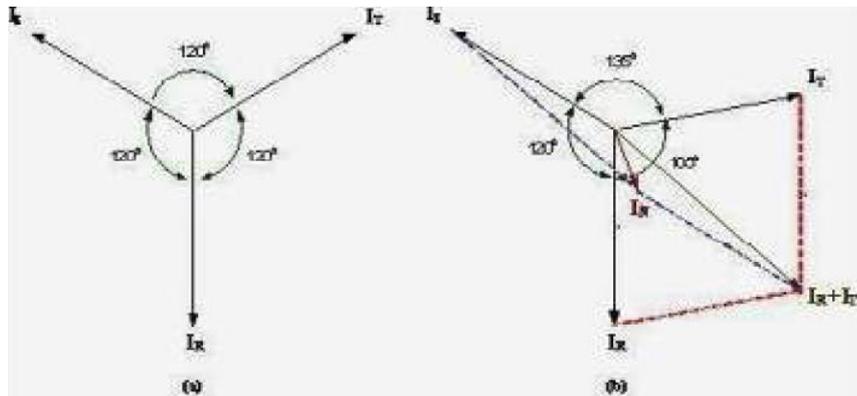
Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana :

- a. Ketiga vektor arus / tegangan sama besar.
- b. Ketiga vektor saling membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi.

Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada tiga yaitu :

- a. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
- b. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
- c. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.



Gambar 2. 10 Vektor Diagram Arus

Menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya ( $I_R, I_S, I_T$ ) adalah sama dengan nol sehingga arus yang tidak seimbang. Disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya ( $I_R, I_S, I_T$ ) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral ( $I_N$ ) yang besarnya tergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.

Apabila terjadi ketidakseimbangan beban dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{I_R I_S I_T}{I_{rata-rata}} \dots \dots \dots (2.7)$$

### 2.3.2 Transformator Ideal

Pada transformator ideal, tidak ada energi yang diubah menjadi bentuk energi lain di dalam transformator, sehingga daya listrik pada kumparan sekunder sama dengan daya listrik pada kumparan primer. Dalam transformator ideal, perbandingan antara tegangan sebanding dengan perbandingan jumlah lilitannya.

Daya pada sisi primer akan sama dengan daya sisi sekunder transformator, maka menggunakan rumus :

$$P_p = P_s$$

Oleh karena:

$$P = V \times I \dots\dots\dots(2.8)$$

Maka diperoleh

$$V_p \times I_p = V_s \times I_s \dots\dots\dots ( 2.9)$$

Dengan menghubungkan persamaan (2.8) dengan (2.9) maka diperoleh rumus dibawah ini :

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_p}{I_s} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana :

$V_p$  = Tegangan primer (volt)

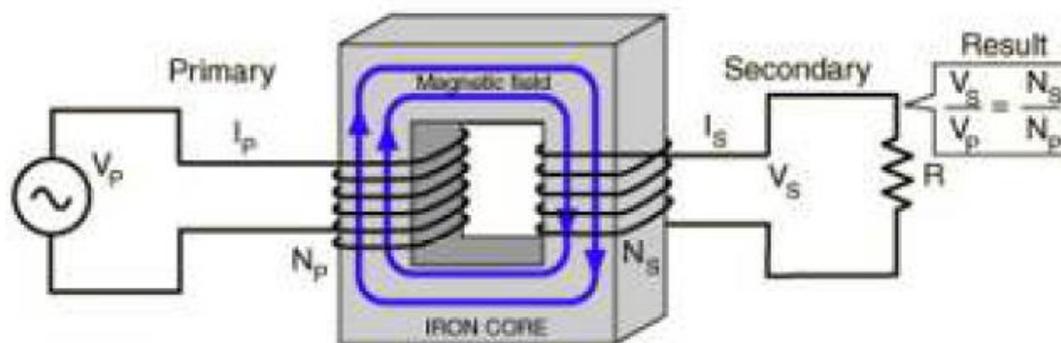
$V_s$  = Tegangan sekunder (Volt)

$N_p$  = Belitan sisi primer (lilitan)

$N_s$  = Belitan sisi primer (lilitan)

$I_p$  = Arus belitan (amper)

$I_s$  = Arus belitan (amper)



Gambar 2. 11 Transformator Ideal

Namun pada kenyataannya tidak ada transformator yang ideal. Hal ini karena pada transformator selalu ada rugi – rugi yang antara lain sebagai berikut :

1. Rugi – rugi tembaga : Rugi – rugi yang disebabkan oleh pemanasan yang timbul akibat arus mengalir pada hambatan kawat penghantar yang terdapat pada kumparan primer dan sekunder dari transformator. Rugi – rugi tembaga sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir pada kumparan.
2. Rugi – rugi arus *Eddy* : Rugi – rugi yang disebabkan oleh pemanasan akibat timbulnya arus *Eddy* (pusar) yang terdapat pada inti besi terlalu tebal sehingga terjadi perbedaan tegangan antara sisinya maka mengalir arus yang berputar – putar di sisi tersebut. Rugi – rugi arus *Eddy* sebanding dengan kuadrat tegangan yang *disupply* ke transformator.
3. Rugi – rugi hysteresis : rugi – rugi yang berkaitan dengan penyusunan medan magnetic didalam inti besi pada etipa setengah siklus, sehingga timbul fluks bolak – balik pada inti besi. Rugi – rugi ini tidak linear dan kompleks.
4. Fluks bocor : kebocoran fluks terjadi karena ada beberapa fluks yang tidak menembus inti besi dan hanya melewati salah satu kumparan transformator saja. Fluks yang bocor ini akan menghasilkan induktansi diri pada lilitan primer dan sekunder sehingga akan berpengaruh terhadap nilai daya yang *disupply* dari sisi primer ke sisi sekunder transformator.[2]

### 2.3.3 Efisiensi

Efisiensi pada transformator adalah perbandingan antara daya keluaran (*output*) dengan daya masukan (*input*). Sebuah transformator tidak membutuhkan bagian yang bergerak untuk memindahkan *energy* dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Ini berarti tidak ada kerugian karena gesekan atau hambatan udara seperti yang terdapat pada mesin-mesin listrik (contoh motor listrik dan *generator*). Namun didalam transformator juga terdapat kerugian yang disebut rugi-rugi tembaga (*copper losses*) dan rugi-rugi besi (*iron losses*).

Rugi-rugi tembaga terdapat pada kumparan primer dan sekunder, sedangkan rugi-rugi besi terdapat dalam inti besi. Rugi-rugi ini berupa panas yang dilepaskan akibat terjadinya *Eddy Current*. Sebuah transformator yang ideal akan memiliki efisiensi sebesar 100%. Ini berarti bahwa semua daya yang diberikan pada kumparan primer dipindahkan ke kumparan sekunder tanpa adanya kerugian.

Sebuah transformator yang real memiliki efisiensi dibawah 100%. Efisiensi suatu transformator dapat dihitung dengan persamaan :

$$\eta = \frac{P_0}{P_1} \times 100\% = \frac{P_0}{P_0 + P_{tl}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.11)$$

### 2.3.4 Daya Pada Saluran Distribusi

Misalnya, daya sebesar ( P ) disalurkan melalui suatu saluran dengan penghantar netral. Jika pada penyaluran daya ini arus-arus fase berada dalam keadaan seimbang, maka besarnya daya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P = \sqrt{3} \cdot [V] \cdot [I] \cdot \cos\phi \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana :

P : Daya pada ujung kirim

V : Tegangan pada ujung kirim

I : Arus fasa

cos φ : Faktor daya

Daya yang sampai di ujung penerima akan lebih kecil dari ( P ) karena terjadi penyusutan dalam saluran. Jika ( I ) adalah besarnya arus fase dalam penyaluran daya sebesar ( P ) pada keadaan seimbang, maka pada penyaluran daya yang sama tetapi dalam keadaan tidak seimbang, besarnya arus-arus fase dapat dinyatakan dengan koefisien ( a ), ( b ), dan ( c ) sebagai berikut:

$$[ I_R ] = a [ I ]$$

$$[ I_S ] = b [ I ]$$

$$[ I_T ] = c [ I ]$$

Dengan IR, IS dan IT berturut – turut adalah arus di fasa R, S dan T. Bila faktor daya di ketiga fasa dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda besarnya daya yang disalurkan dapat dinyatakan pada pernyataan rumus .

### 2.3.5 Kualitas Daya

Masalah kualitas daya adalah persoalan perubahan bentuk tegangan, arus atau frekuensi yang bisa menyebabkan kegagalan, peralatan, baik peralatan milik PLN maupun milik konsumen, artinya masalah kualitas daya bisa merugikan pelanggan maupun PLN.

Suatu sistem tenaga listrik dituntut dapat memenuhi syarat dasar kebutuhan layanan kepada konsumen yaitu:

1. Dapat memenuhi beban puncak.

2. Memiliki deviasi frekuensi dan tegangan yang minimum.
3. Menjamin urutan fasa yang benar.
4. Menjamin distorsi gelombang tegangan dan harmonik yang minimum dan bebas dari tegangan surya.
5. Menjamin *supply system* tegangan dalam keadaan setimbang.
6. Memberikan *supply* daya dengan keandalan tinggi dengan presentase waktu layanan tinggi dimana *system* dapat melayani beban secara efektif.

Enam hal diatas dapat dijadikan tolak ukur, apakah layanan yang di berikan sudah baik atau belum. Masalah kualitas daya menjadi penting karena:

1. Saat ini kualitas peralatan yang dimiliki konsumen lebih *sensitive*.
2. Pada *system* utilitas telah terjadi meningkat *level harmonic*.
3. Konsumen belum memiliki dan mendapat informasi yang cukup mengenai masalah kualitas daya.
4. Kegagalan suatu komponen pada *system* distribusi dan instalasi bisa membawa konsekuensi tertentu [4]

### 2.3.6 Susut Pada Sistem Distribusi

Susut adalah kehilangan energi listrik yang terjadi selama proses penyaluran daya dari trafo distribusi ke beban (konsumen). Energi ini tidak sampai ke pelanggan karena hilang dalam bentuk panas dan medan magnet.

1. Susut Tetap (*Fixed Losses*) – Tidak tergantung beban

Disebut juga *no-load losses* atau *core losses* terjadi saat trafo dalam keadaan hidup (*on*), walaupun tanpa beban.

Sumbernya dari:

- a. Histeresis pada inti besi trafo
- b. *Eddy Current loss* (arus pusar) dalam inti besi
- c. Tetap konstan, tidak peduli seberapa besar arus beban
- d. Diukur dalam Watt (W)

2. Susut Beban (*Load Losses*) – Tergantung arus beban

Disebut juga *copper losses* (karena terjadi di kumparan tembaga)

- a. Terjadi karena hambatan (R) dari kawat kumparan primer dan sekunder
- b. Semakin besar beban → semakin besar arus → semakin besar susut

### 2.3.7 Rugi-Rugi Transmisi

Transmisi daya listrik menimbulkan kerugian yang disebabkan oleh berbagai faktor fisik maupun teknis, sehingga mengakibatkan hilangnya sebagian energi dalam bentuk panas dan bentuk inefisiensi lainnya. Kerugian ini terjadi selama proses penyaluran tenaga listrik jarak jauh dari pembangkit listrik hingga ke konsumen. Secara umum, faktor-faktor utama yang menyebabkan kerugian transmisi daya meliputi:

- a. Hambatan Saluran Transmisi: Saluran transmisi, yang digunakan untuk mengalirkan listrik jarak jauh, memiliki hambatan yang melekat terhadap aliran arus. Hambatan ini menyebabkan sebagian energi listrik diubah menjadi panas, sesuai dengan Hukum Ohm ( $V=IR$ ). Ketika arus mengalir melalui saluran transmisi, sebagian energi hilang sebagai panas karena hambatan konduktor.
- b. Pemanasan *Joule* : Arus listrik yang mengalir melalui penghantar dengan hambatan tertentu akan menimbulkan fenomena pemanasan Joule, yaitu proses konversi energi listrik menjadi energi panas akibat adanya resistansi material penghantar. Besarnya panas yang dihasilkan berbanding lurus dengan kuadrat arus yang mengalir, sehingga semakin besar arus, semakin tinggi pula panas yang timbul, yang pada akhirnya meningkatkan besarnya kerugian daya.
- c. Efek Kulit : Pada penghantar yang dialiri arus bolak-balik (AC), khususnya pada frekuensi tinggi, distribusi arus cenderung terkonsentrasi di bagian permukaan konduktor. Fenomena ini dikenal sebagai *skin effect* atau efek kulit. Akibat berkurangnya luas penampang efektif penghantar, resistansi konduktor meningkat, sehingga menyebabkan kerugian daya yang lebih besar.
- d. Efek Kulit : Pada konduktor yang dialiri arus bolak-balik (AC), terutama pada frekuensi tinggi, distribusi arus cenderung terkonsentrasi di bagian permukaan konduktor. Fenomena ini dikenal sebagai *skin effect* atau efek kulit. Akibat berkurangnya luas penampang efektif yang dilalui arus, resistansi konduktor meningkat, sehingga menyebabkan kerugian energi yang lebih besar selama proses transmisi daya.
- e. Reaktansi Induktif dan Kapasitif : Saluran transmisi memiliki sifat induktif dan kapasitif yang memengaruhi aliran arus bolak-balik (AC). Keberadaan reaktansi

ini menyebabkan terjadinya perbedaan fasa antara arus dan tegangan, sehingga sebagian energi hanya beresilasi bolak-balik di dalam sistem tanpa tersalurkan secara efektif kepada beban. Fenomena ini berkontribusi terhadap kerugian daya pada sistem transmisi.

- f. Pelepasan Korona : Pada saluran transmisi bertegangan tinggi, dapat terjadi fenomena pelepasan korona (*corona discharge*), yaitu proses terionisasinya udara di sekitar konduktor akibat kuat medan listrik yang tinggi. Proses ini mengakibatkan hilangnya energi dalam bentuk cahaya, panas, dan bunyi, serta dapat menimbulkan gangguan gelombang radio di sekitar saluran transmisi.
- g. Ketidaksesuaian antara Pembangkitan dan Konsumsi : Keseimbangan antara daya listrik yang dibangkitkan dan daya yang dikonsumsi tidak selalu terjaga. Ketidaksesuaian ini, baik dalam bentuk kelebihan maupun kekurangan daya terhadap kebutuhan beban, dapat menyebabkan inefisiensi sistem. Dalam transmisi jarak jauh, kondisi tersebut berpotensi meningkatkan kerugian daya karena penyesuaian beban dan *supply* memerlukan pengaturan tambahan yang tidak selalu optimal.
- h. Penurunan Tegangan : Transmisi daya jarak jauh dapat menyebabkan penurunan tegangan (*voltage drop*) di sepanjang saluran transmisi. Untuk mengimbangi penurunan ini, sering kali diperlukan peningkatan tegangan pada sisi pembangkitan. Namun, penggunaan tegangan yang lebih tinggi dapat memperbesar kerugian, baik akibat meningkatnya kuat medan listrik maupun timbulnya pelepasan korona, sehingga efisiensi sistem transmisi menurun.

Upaya untuk meminimalkan kerugian transmisi dilakukan melalui berbagai metode, antara lain penggunaan material penghantar dengan konduktivitas tinggi, optimalisasi desain saluran transmisi, pemanfaatan transformator berkapasitas dan efisiensi tinggi, serta penerapan teknologi seperti transmisi arus searah tegangan tinggi (*High Voltage Direct Current / HVDC*) yang dapat mengurangi jenis kerugian tertentu. Meskipun demikian, kerugian pada tingkat tertentu tetap tidak dapat dihilangkan sepenuhnya karena keterbatasan yang melekat pada prinsip dasar konduksi listrik dan proses transfer energi.

## 2.4 Sifat – Sifat Listrik Yang Menentukan Kinerja Cairan Isolasi

Sifat-sifat listrik yang menentukan kinerja cairan sebagai isolator adalah:

- a) *Withstand breakdown*: Kemampuan untuk tidak mengalami ketembusan dalam kondisi tekanan listrik (*electric stress*) yang tinggi.
- b) Kapasitas listrik per unit volume: Ini menentukan primitivitas relatifnya. Minyak petroleum merupakan substansi *nonpolar* yang efektif karena merupakan campuran cairan hidrokarbon. Minyak ini memiliki primitivitas sekitar 2 hingga 5. Ketidakbergantungan primitivitas substansi nonpolar pada frekuensi membuat bahan ini lebih banyak digunakan dibandingkan dengan bahan yang bersifat polar. Misalnya, air memiliki primitivitas 78 pada frekuensi 50 Hz, namun hanya memiliki primitivitas 5 untuk gelombang mikro.
- c) Faktor daya: Faktor dissipasi daya dari minyak di bawah tekanan bolak-balik dan tinggi akan menentukan kinerjanya, karena dalam kondisi terbebani terdapat sejumlah rugi-rugi dielektrik. Faktor dissipasi sebagai ukuran rugi daya merupakan parameter yang penting bagi kabel dan kapasitor. Minyak transformator murni memiliki faktor dissipasi yang bervariasi antara ( $10^{-4}$ ) pada 20°C dan ( $10^{-3}$ ) pada 90°C pada frekuensi 50 Hz.

Berdasarkan standar yang dikeluarkan oleh ASTM, dalam standar D-877 disebutkan bahwa suatu bahan isolasi harus memiliki tegangan tembus sebesar kurang lebih 30 kV untuk lebar sela elektroda 1 mm. Dengan kata lain, kekuatan dielektrik bahan isolasi adalah kurang lebih 30 kV/mm. Sedangkan menurut standar ATM D-1816, suatu bahan isolasi harus mampu menahan tegangan sebesar 28 kV untuk lebar sela elektroda sebesar 1,2 mm. Standar ini merupakan standar yang diterima secara internasional dan harus dipenuhi oleh suatu bahan yang dikategorikan sebagai bahan isolasi.

### 2.4.1 Pendingin

Pada inti besi dan kumparan – kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi tembaga. Bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan akan meruak isolasi di dalam *transformator*. Maka untuk mengurangi kenaikan suhu transformator yang berlebihan maka perlu dilengkapi dengan alat/sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator.[2]

Perubahan *temperature* akibat perubahan beban maka seluruh komponen trafo akan menjadi panas, guna mengurangi panas pada trafo dilakukan pendinginan pada trafo, guna mengurangi pada trafo dilakukan pendinginan pada trafo. Sedangkan cara pendinginan trafo terdapat dua macam yaitu : alamiah/natural (Onan) dan paksa/tekanan (Onaf). Pada pendinginan alamiah (*natural*) melalui sirip-sirip radiator yang bersirkulasi dengan udara luar dan untuk trafo yang besar minyak pada trafo disirkulasikan dengan pompa. Sedangkan pada pendinginan paksa pada sirip-sirip trafo terdapat *fan* yang bekerjanya sesuai setting temperaturnya.[9]

Media yang dipakai pada sistem pendingin dapat berupa :

1. Udara/Gas.
2. Minyak.
3. Air.
4. Dan Lain Sebagainya.

Sedangkan pengalirannya (sirkulasi) dapat dengan cara :

1. Alamiah (*natural*).
2. Tekanan/Paksaan.

### 2.5 Cos Phi Meter

Dalam pengertian sehari – hari disebut pengukur cosinus phi ( $\phi$ ) Tujuan pengukuran Cos  $\phi$  atau pengukur nilai cosinus sudut phasa adalah memberikan penunjukan secara langsung dari selisih phasa yang timbul antara arus dan tegangan. Kita menghendaki bukan penunjukan sudut phasa melainkan penunjukan cosinus phi. Untuk menghitung Cos  $\phi$  dengan menggunakan rumus :

$$\frac{P}{V.I} = \cos \dots \dots \dots (2.13)$$

Keterangan :

- P : Daya dalam satuan watt.  
 V : Tegangan dalam satuan volt.  
 I : Arus listrik dalam satuan ampere.

[2]

## 2.6 Segitiga Daya

Segitiga daya adalah representasi grafis dari hubungan antara tiga jenis daya dalam sistem kelistrikan: daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S). Segitiga ini berbentuk segitiga siku-siku, di mana daya aktif adalah sisi horizontal, daya reaktif adalah sisi vertikal, dan daya semu adalah sisi miring atau hipotenusa.

a. Daya Aktif (P):

Daya yang benar-benar digunakan untuk melakukan kerja, seperti menyalakan lampu atau menjalankan mesin. Satuannya adalah Watt (W).

b. Daya Reaktif (Q):

Daya yang diperlukan oleh beban induktif (seperti motor) atau kapasitif untuk membentuk medan magnet atau medan listrik. Daya ini tidak melakukan kerja, tetapi diperlukan untuk operasi beban tersebut. Satuannya adalah *Volt-Ampere Reaktif* (VAR).

c. Daya Semu (S):

Jumlah vektor dari daya aktif dan daya reaktif. Ini adalah daya total yang disediakan oleh sumber listrik. Satuannya adalah *Volt-Ampere* (VA).

Hubungan dalam Segitiga Daya:

Ketiga daya ini berhubungan melalui teorema Pythagoras, di mana:

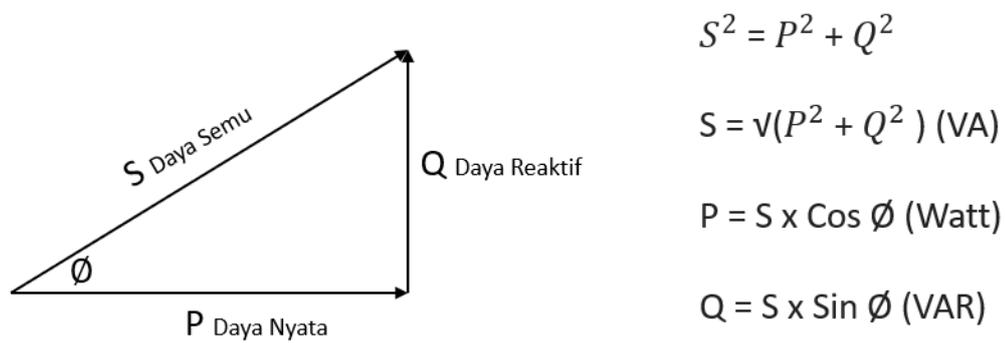
$$S^2 = P^2 + Q^2 \dots\dots\dots(2.14)$$

*Generator* listrik ialah peralatan yang memproduksi tenaga listrik dari sumber tenaga mekanik, biasanya dengan mengenakan induksi elektromagnetik. Sederhananya, *generator* yakni yakni mesin dengan tenaga gerak (mekanik) yang sehabis itu mampu mengubah jadi tenaga listrik (elektrik). Sebagaimana kita tahu *generator* listrik ialah fitur yang mengubah tenaga mekanik jadi tenaga listrik. Sebetulnya *generator* tidak menciptakan tenaga listrik, melainkan hanya mengenakan tenaga mekanis yang dipasok buat mengerakkan muatan listrik.[10]

$$\text{Faktor daya } (\cos \varphi) = \text{Daya Aktif (P) / Daya Semu (S)}$$

$$\text{Daya Reaktif (Q)} = \text{Daya Semu (S) * } \sin \varphi$$

$$\text{Daya Semu (S)} = \sqrt{(\text{Daya Aktif}^2 + \text{Daya Reaktif}^2)}$$



Gambar 2. 12 Segitiga Daya

## 2.7 Harmonisa

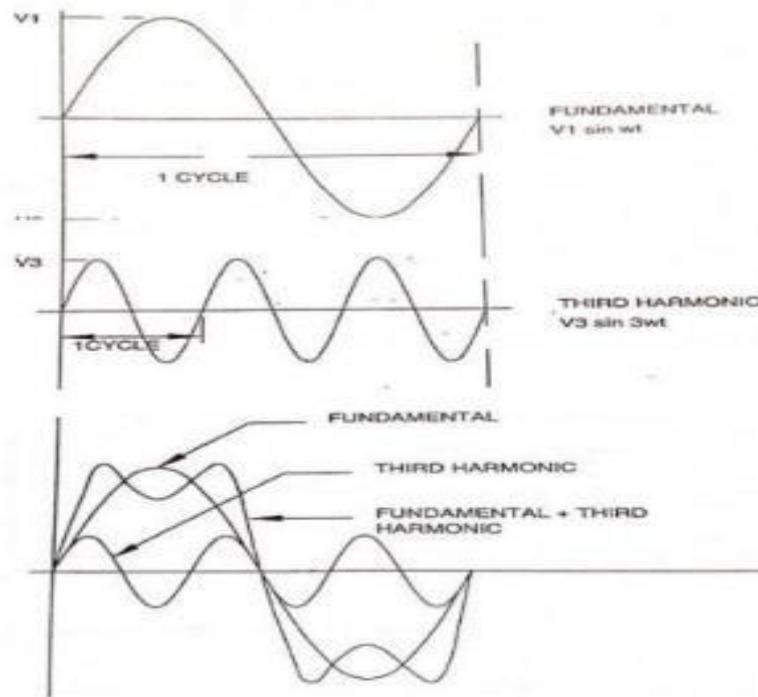
Harmonisa adalah gangguan gelombang sinus di sistem tenaga listrik yang terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik yang disebabkan adanya distorsi gelombang arus dan tegangan. Distorsi atau penyimpangan gelombang arus dan tegangan ini dapat disebabkan oleh beban-beban *non linier* seperti *Inverter*, *Uninterruptible Power Supply (UPS)*, motor, kompresor dengan frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi fundamentalnya.[11]

Harmonisa yang menyebabkan distorsi pada gelombang sinus fundamental dapat terdiri atas beberapa komponen harmonisa utama, seperti harmonisa ke-1, harmonisa ke-2, harmonisa ke-3, dan seterusnya. Harmonisa ke-3 adalah komponen harmonisa yang memiliki frekuensi tiga kali lipat dari frekuensi fundamental. Dengan demikian, apabila frekuensi fundamental sistem adalah 50 Hz, maka frekuensi harmonisa ke-3 adalah sebesar 150 Hz, yang dapat dinyatakan dengan persamaan (5).

$$h = n \times 50 \text{ hz} \dots \dots \dots (2.15)$$

h= Harmonisa gelombang (%)

n= Jumlah gelombang harmonik

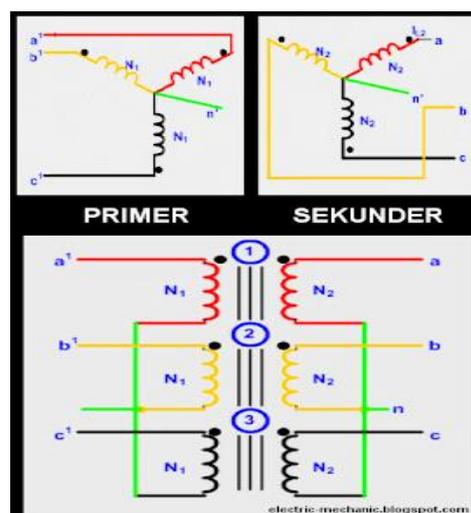


Gambar 2. 13 Gelombang *Fundamental*

## 2.8 Jenis Hubungan Pada Belitan Transformator Tiga Fasa

### 1. Trafo 3 fasa Hubung Bintang Bintang (Y-Y)

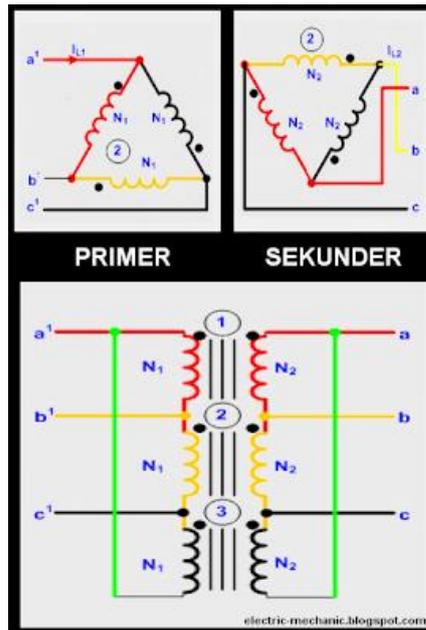
Pada jenis ini, ujung-ujung masing-masing kumparan dihubungkan dalam konfigurasi bintang, di mana titik netral disatukan. Konfigurasi ini lebih ekonomis untuk digunakan pada arus nominal kecil, khususnya pada transformator tegangan tinggi.



Gambar 2. 14 Trafo Hubung Bintang Bintang

## 2. Trafo Hubung Segitiga-Segitiga ( $\Delta - \Delta$ )

Pada jenis ini, ujung fasa suatu kumparan dihubungkan dengan ujung netral kumparan lainnya, sehingga secara keseluruhan membentuk konfigurasi delta (segitiga). Konfigurasi ini umumnya digunakan pada sistem yang menyalurkan arus besar pada tegangan rendah, serta sangat bermanfaat untuk mempertahankan kontinuitas pelayanan meskipun salah satu fasa mengalami kegagalan.

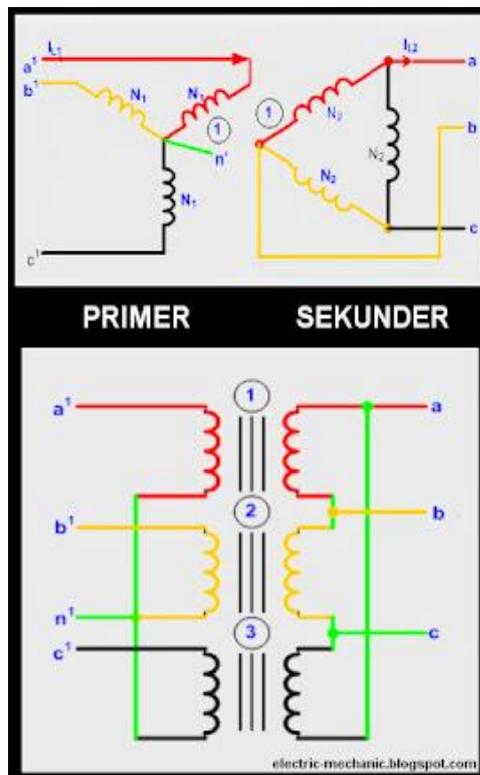


Gambar 2. 15 Trafo Hubung Delta Delta

## 3. Trafo Hubung Bintang Segi tiga (Y - $\Delta$ )

Pada konfigurasi ini, kumparan pada sisi primer dirangkai dalam bentuk bintang (wye), sedangkan kumparan pada sisi sekunder dirangkai dalam bentuk delta. Konfigurasi ini umumnya digunakan pada transformator yang terhubung ke jaringan transmisi untuk menurunkan tegangan (step-down).

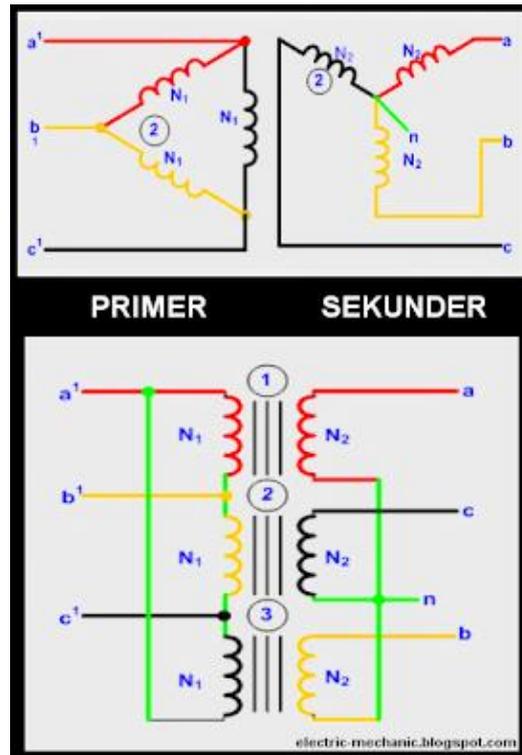
Perbandingan tegangan jala- jala  $1/\sqrt{3}$  kali perbandingan lilitan transformator. Tegangan sekunder tertinggal  $30^\circ$  dari tegangan primer.



Gambar 2. 16 Trafo Hubung Bintang Delta

#### 4. Trafo Hubungan Segitiga Bintang ( $\Delta - Y$ )

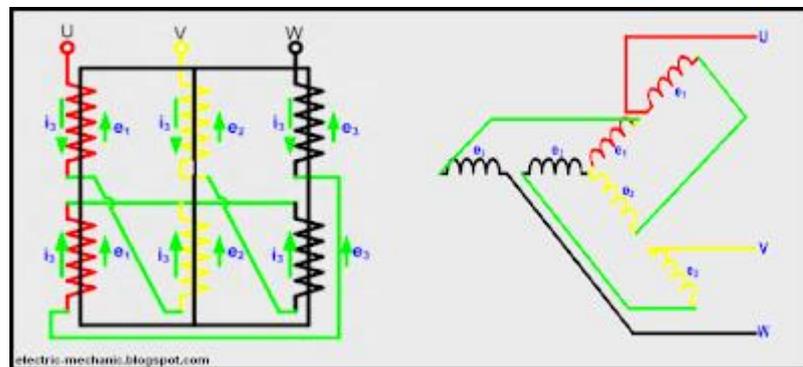
Pada konfigurasi ini, sisi primer transformator dirangkai dalam bentuk delta, sedangkan sisi sekundernya dirangkai dalam bentuk bintang sehingga menghasilkan titik netral pada sisi sekunder. Konfigurasi ini umumnya digunakan untuk menaikkan tegangan (step-up) pada awal sistem transmisi tegangan tinggi. Dalam hubungan ini, perbandingan tegangannya adalah tiga kali perbandingan jumlah lilitan transformator, dan tegangan pada sisi sekunder mendahului tegangan pada sisi primer sebesar  $30^\circ$ .



Gambar 2. 17 Trafo Hubung Delta Bintang

#### 5. Trafo Hubungan Zig-Zag

Sebagian besar transformator distribusi menggunakan konfigurasi hubungan bintang. Salah satu syarat yang harus dipenuhi oleh transformator jenis ini adalah keseimbangan ketiga fasanya. Apabila beban tidak seimbang, akan timbul tegangan pada titik netral yang tidak diinginkan, sehingga tegangan pada peralatan pengguna dapat berbeda-beda. Untuk menghindari terjadinya tegangan pada titik netral, salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah menghubungkan sisi sekunder transformator dalam konfigurasi zig-zag.



Gambar 2. 18 Trafo Hubung Zig-Zag

Ujung-ujung kumparan sekunder dihubungkan sedemikian rupa sehingga arah aliran arus pada masing-masing kumparan saling berlawanan. Karena tegangan  $e_1$  tersambung berlawanan dengan tegangan pada gulungan  $e_2$ .

Maka jumlah vektor dari kedua tegangan tersebut adalah:

$$e_{Z1} = e_1 - e_2$$

$$e_{Z2} = e_2 - e_3$$

$$e_{Z3} = e_3 - e_1$$

$$e_{Z1} + e_{Z2} + e_{Z3} = 0 = 3 e_b$$

Tegangan Titik Bintang :

$$e_b = 0$$

$$e_1 = e/2$$

Nilai tegangan fasa :

$$e_z = e/2 \sqrt{3}$$

Sedangkan tegangan jala jala :

$$E_z = e_z \sqrt{3} = e/2 \sqrt{3}$$

## 6. Transformator Tiga Fasa dengan Dua Kumparan

Selain hubungan transformator seperti telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya, ada transformator tiga fasa dengan dua kumparan. Tiga jenis hubungan yang umum digunakan adalah :

- a. V - V atau "Open  $\Delta$  "
- b. "Open Y - Open  $\Delta$  "
- c. Hubungan T - T

## 2.9 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Untuk memenuhi kebutuhan penyediaan tenaga listrik bagi konsumen, diperlukan berbagai jenis peralatan listrik yang saling terhubung dan memiliki keterkaitan fungsional. Secara keseluruhan, rangkaian peralatan ini membentuk suatu sistem tenaga listrik, yaitu sekumpulan pusat pembangkit listrik dan gardu induk (pusat beban) yang saling terhubung melalui jaringan transmisi, sehingga membentuk suatu kesatuan sistem yang terinterkoneksi.

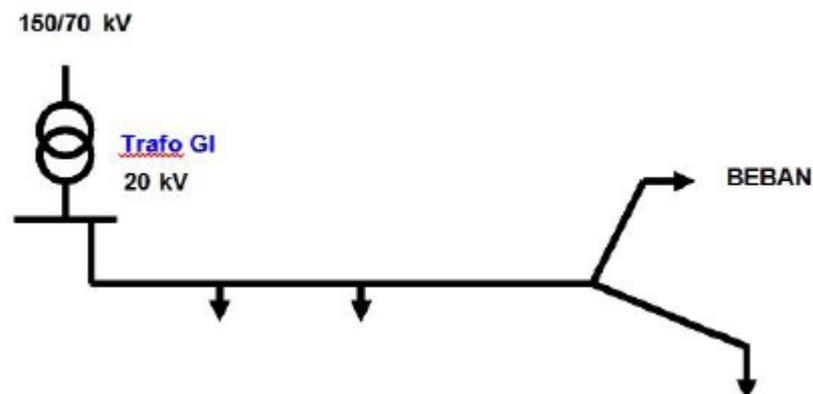
Sistem penyaluran tenaga listrik dari pembangkit hingga ke konsumen (beban) merupakan aspek penting yang perlu dipelajari. Proses penyaluran ini berlangsung melalui beberapa tahap, dimulai dari pembangkit tenaga listrik sebagai penghasil

energi listrik yang menyalurkan daya ke jaringan transmisi (Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi / SUTET) menuju gardu induk. Dari gardu induk, tenaga listrik dialirkan ke jaringan distribusi primer (Saluran Udara Tegangan Menengah / SUTM), kemudian melalui gardu distribusi disalurkan ke jaringan distribusi sekunder (Saluran Udara Tegangan Rendah / SUTR), hingga akhirnya sampai kepada konsumen. Dengan demikian, sistem distribusi tenaga listrik berfungsi membagikan daya kepada pengguna melalui jaringan tegangan rendah, sedangkan saluran transmisi berperan menyalurkan tenaga listrik bertegangan ekstra tinggi dalam kapasitas daya besar menuju pusat-pusat beban.

Berdasarkan konfigurasi jaringan, terdapat beberapa jenis sistem saluran distribusi tegangan menengah yang umum digunakan, yaitu sistem saluran distribusi radial, sistem saluran distribusi loop, dan sistem saluran distribusi spindel.

#### a. Sistem Saluran Distribusi *Radial*

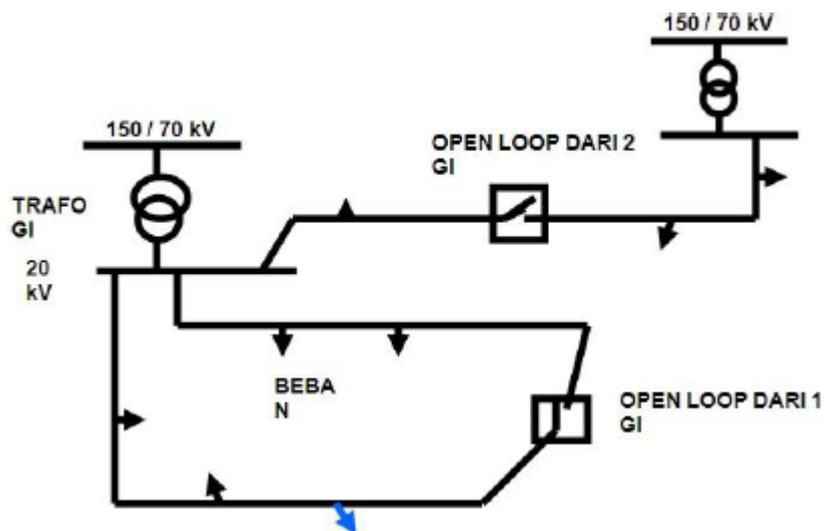
Pada sistem saluran distribusi radial, aliran daya menuju beban hanya melalui satu jalur. Sistem ini umumnya digunakan untuk melayani wilayah dengan kerapatan beban rendah hingga sedang. Dalam konfigurasi ini, setiap *feeder* menyalurkan tenaga listrik secara terpisah, tanpa keterhubungan langsung dengan *feeder* lainnya. Saluran utama ditarik dari satu sumber daya atau gardu induk, kemudian dicabangkan untuk melayani berbagai beban di sepanjang jalur distribusi. Gambar 19 memperlihatkan konfigurasi sistem saluran distribusi *radial*.



Gambar 2. 19 Sistem Saluran Distribusi *Radial*

b. Sistem Saluran Distribusi *Loop*

Konfigurasi saluran distribusi *loop* merupakan interkoneksi antar gardu distribusi yang membentuk suatu lingkaran tertutup. Dalam konfigurasi ini, dapat terdapat lebih dari satu *busbar* pada gardu induk (GI), di mana masing-masing penyulang membentuk rangkaian tertutup dengan GI. Keunggulan utama sistem *loop* adalah keandalan pasokan daya listrik yang lebih terjamin. Apabila salah satu GI mengalami gangguan, penyulang tetap dapat menerima pasokan dari GI lain yang beroperasi normal, sehingga kontinuitas *supply* listrik tetap terjaga. Selain itu, GI yang mengalami gangguan dapat diperbaiki tanpa mengganggu *supply* daya ke gardu distribusi lainnya. Gambar 20 memperlihatkan konfigurasi sistem saluran distribusi *loop*.



Gambar 2. 20 Sistem Saluran Distribusi *Loop*

c. Sistem Jaringan Distribusi Premier

Sistem jaringan distribusi primer merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang menghubungkan gardu induk dengan gardu distribusi. Umumnya, jaringan ini berbentuk sistem tiga fasa dengan tiga atau empat kawat. Penyaluran tenaga listrik dapat dilakukan melalui saluran udara, kabel udara, atau kabel bawah tanah, tergantung pada tingkat keandalan yang diperlukan. Saluran distribusi

primer dibangun membentang dari sumber pasokan listrik hingga mencapai pusat beban di ujung jaringan.

Sistem jaringan distribusi primer dikenal beberapa macam tipe jaringan distribusi primer, dimana masing-masing system mempunyai karakteristik-karakteristik yang berbeda-beda serta mempunyai keuntungan dan kerugian yang tergantung pada kebutuhan. Dasar pemilihan suatu sistem tergantung dari tingkat kepentingan konsumen/pusat beban itu sendiri.[12]

### 2.10 Standart Beban Trafo

<i>Characteristic Group</i>	<i>Characteristic</i>	<i>Health Index</i>			
		Baik	Cukup	Kurang	Buruk
<i>Load Reading and Profilling</i>	Ketidakseimbangan Arus Antar Fasa	<10%	10%- <20%	20%- <25%	≥25 %
	Besar Arus Netral (%Terhadap arus beban trafo)	<10%	10%- <20%	15%- <20%	≥20 %
	Pembebanan Trafo (%Terhadap kapasitas)	<10%	60%- <80%	80%- <100%	≥100 %

Table 2. 1 *Standart* beban trafo menurut edaran PLN No.17 Tahun 2014

Tabel 2.1 menunjukkan standar penilaian beban transformator berdasarkan Surat Edaran Direksi PT PLN (Persero) No.17 Tahun 2014. Parameter penilaian dibagi menjadi tiga karakteristik utama, yaitu: ketidakseimbangan arus antar fasa, besar arus netral (dinyatakan sebagai persentase terhadap arus beban trafo), dan pembebanan trafo (dinyatakan sebagai persentase terhadap kapasitas nominal trafo).

Setiap karakteristik diklasifikasikan ke dalam empat kategori kondisi kesehatan (*health index*), yaitu Baik, Cukup, Kurang, dan Buruk, dengan rentang nilai persentase yang telah ditentukan. Nilai persentase yang lebih rendah pada ketidakseimbangan arus dan arus netral menunjukkan kondisi yang lebih baik, sedangkan nilai persentase pembebanan trafo yang terlalu tinggi mengindikasikan potensi risiko beban berlebih.

Standar ini digunakan sebagai acuan dalam pemantauan dan evaluasi kondisi operasi transformator, sehingga dapat membantu dalam perencanaan pemeliharaan dan pencegahan kerusakan.

### **2.11 *Neutral Grounding Resistance (NGR)***

*Neutral Grounding Resistance* adalah suatu peralatan yang berfungsi untuk memperkecil atau membatasi arus hubung singkat dari netral trafo di sisi sekunder ke tanah/ground, sehingga nilai arusnya di bawah nominal arus trafo. Adapun jenis dari ngr tersebut yaitu jenis metal dan ada yang jenis liquid/cairan.[13]

Dengan membatasi arus gangguan, NGR membantu melindungi transformator, generator, dan peralatan lain dari kerusakan akibat arus berlebih. NGR membantu menjaga stabilitas sistem tenaga listrik dengan mencegah fluktuasi tegangan yang berlebihan selama gangguan. Arus gangguan yang dibatasi oleh NGR memudahkan deteksi gangguan oleh sistem proteksi. Adapun beberapa jenis dari grounding tersebut :

1. Pentanahan Langsung

Pentanahan Langsung yaitu pentanahan titik netral sisi sekunder transformator daya secara langsung tanpa menggunakan tahanan.

2. Pentanahan Dengan Tahanan Tinggi (*High Resistance*)

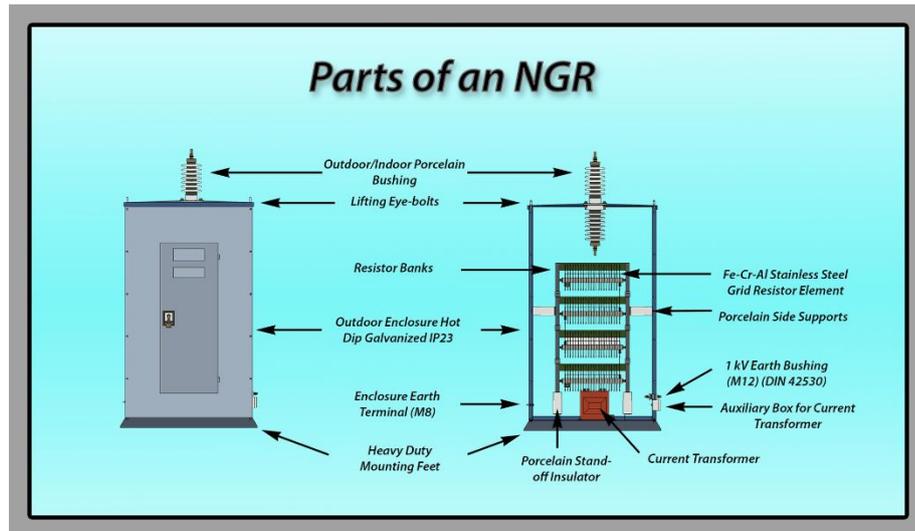
Pentanahan Dengan Tahanan Tinggi yaitu pentanahan titik netral sisi sekunder transformator daya dengan menggunakan tahanan tinggi sebesar 500 Ohm.

3. Pentanahan Dengan Tahanan Rendah (*Low Resistance*)

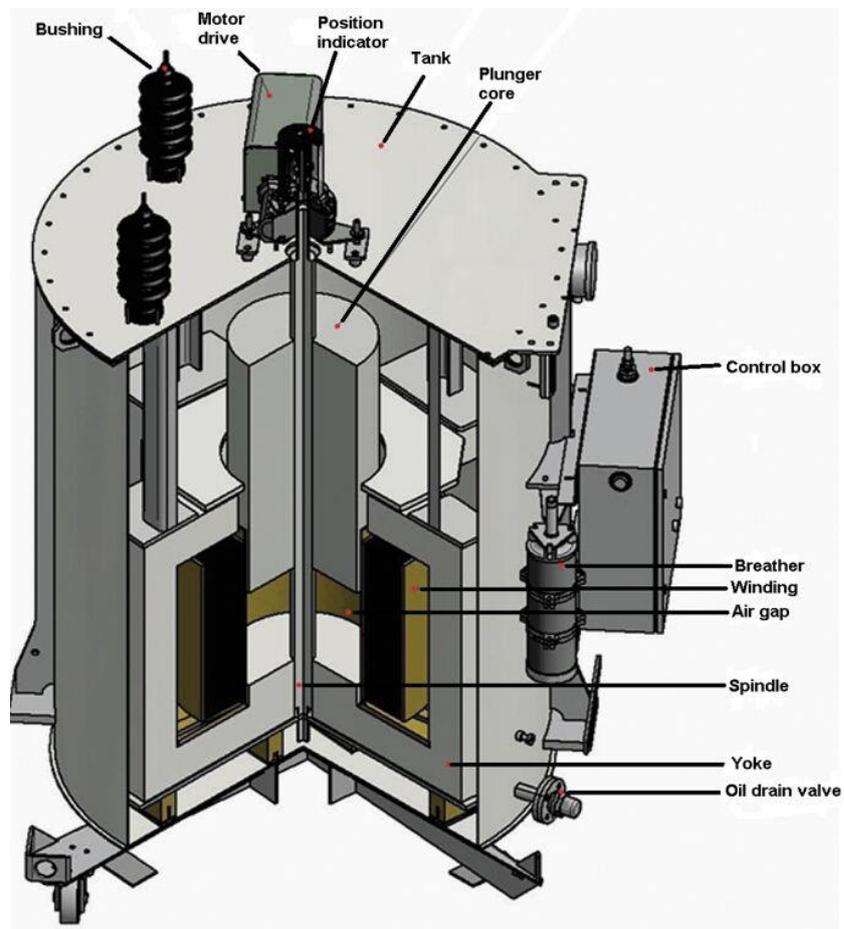
Pentanahan Dengan Tahanan Rendah yaitu pentanahan titik netral sisi sekunder transformator daya dengan menggunakan tahanan tinggi sebesar 40 Ohm untuk SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah) dan 12 Ohm untuk SKTM (Saluran Kabel Tegangan Menengah).

4. Pentanahan Mengambang (*Floating*)

Pentanahan Mengambang yaitu titik netral sisi sekunder transformator daya tidak ditanahkan.



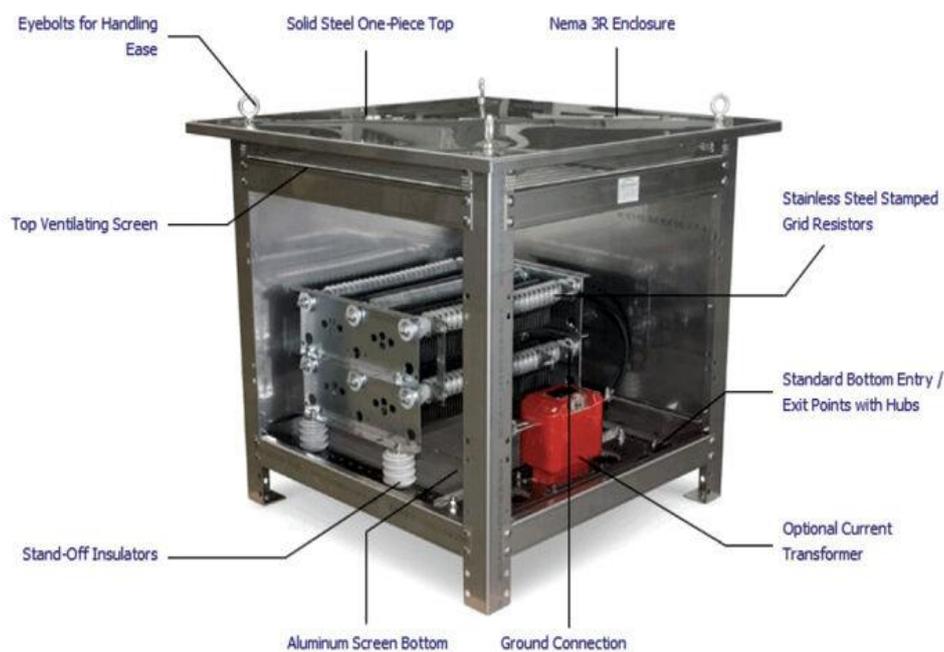
Gambar 2. 21 Bagian-bagian dari (NGR)



Gambar 2. 22 (NGR) Jenis Liquid

*Liquid Neutral Grounding Resistor (LNGR)* merupakan tahanan pentanahan yang menggunakan larutan air murni dalam sebuah bejana. Untuk memperoleh nilai tahanan yang sesuai, larutan air murni tersebut ditambahkan garam (NaCl).

LNGR memiliki konstruksi yang relatif sederhana, biaya pembuatan lebih rendah dibandingkan jenis tahanan padat (*solid resistor*), serta mampu meredam arus gangguan tanah secara efektif sehingga meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik.



Gambar 2. 23 (NGR) Jenis Metal

Solid Neutral Grounding Resistor (Solid NGR) merupakan jenis tahanan pentanahan yang menggunakan bahan padat berupa logam sebagai media tahanannya. Bahan logam yang digunakan antara lain *Stainless Steel*, *Cast Iron*, *Copper Nickel*, maupun *Nichrome*. Pemilihan material tersebut didasarkan pada karakteristik ketahanan panas, daya hantar listrik, serta kemampuan mempertahankan nilai resistansi secara stabil dalam jangka panjang.

Nilai tahanan pada *Solid* NGR diatur melalui dimensi fisik, jumlah elemen tahanan, dan jenis material yang digunakan, sehingga dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem tenaga listrik. Dibandingkan dengan *Liquid* NGR, jenis solid memiliki keunggulan dalam hal kestabilan nilai resistansi karena tidak dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, konsentrasi larutan, maupun faktor penguapan. Selain itu, konstruksinya yang kokoh menjadikan *Solid* NGR lebih tahan lama, memerlukan perawatan yang minimal, serta lebih andal untuk aplikasi jangka panjang pada sistem tenaga listrik yang membutuhkan keandalan dan kestabilan tinggi.

*Neutral Grounding Resistor* (NGR) memiliki beberapa fungsi penting dalam sistem tenaga listrik, yaitu:

1. Membatasi arus gangguan satu fasa ke tanah pada jaringan tegangan menengah. Hal ini bertujuan untuk mencegah timbulnya arus gangguan yang terlalu besar, sehingga dapat mengurangi risiko kerusakan pada transformator daya, *generator*, maupun peralatan listrik lainnya.
2. Mengurangi tegangan lebih sesaat (*transient overvoltage*) yang terjadi akibat pemutusan mendadak saat terjadi gangguan. Dengan demikian, masa pakai peralatan *switchgear* dapat lebih panjang dan keandalannya tetap terjaga.
3. Menurunkan tegangan langkah dan tegangan sentuh hingga pada tingkat yang aman. Hal ini sangat penting untuk melindungi keselamatan operator maupun personel yang bekerja di sekitar peralatan, terutama ketika terjadi gangguan hubung tanah.

Adapun kerugian NGR :

1. Timbulnya rugi – rugi daya pada tahanan pentanahan selama terjadinya gangguan fasa ke tanah.
2. Karena arus gangguan ke tanah relatif kecil, kepekaan *relay* pengaman menjadi berkurang dan lokasi gangguan sulit untuk dideteksi.

Secara umum besar tahanan yang di tentukan pada hubungan netral adalah sebagai berikut :

$$R = \frac{E_f}{I} \text{ Ohm} \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana :

R = Tahanan (Ohm)

$E_f$  = Tegangan fasa ke netral (V)

$I$  = Beban penuh dari transformator (A)

Batasan operasi dan nilai NGR yaitu:

Transformator daya 150/70 kV , 100 MVA

Tegangan = 70 kV

Tahanan = 40 - 60 Ohm

Arus nominal = 650 – 1000 A

Waktu = 30 *second*

Transformator daya 150/20 kV, 30 – 60 MVA

Tegangan = 20 kV

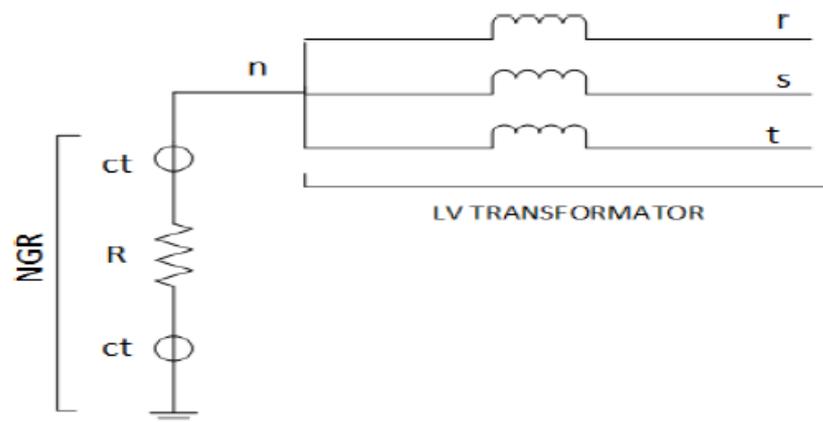
Tahanan = 12 – 40 Ohm

Arus nominal = 870 – 1150 A

Waktu = 10 *second*

### 2.12 Rangkaian *Neutral Grounding Resistance* (NGR)

Didalam NGR terdapat komponen-komponen yaitu seperti trafo arus dan resistor itu sendiri, dan NGR juga memiliki suatu rangkaian. Adapun rangkaian NGR adalah sebagai berikut :



Gambar 2. 24 Rangkaian *Neutral Grounding Resistance*

Pada Gambar 2.24 diperlihatkan posisi pemasangan *Neutral Grounding Resistor* (NGR), yaitu dihubungkan pada titik netral transformator. Dengan kata lain, transformator pada sisi sekunder menggunakan konfigurasi hubungan bintang (*star connection*) yang memiliki titik nol/netral. Titik netral tersebut kemudian dihubungkan ke NGR, dan selanjutnya disambungkan ke tanah (*grounding*).

### 2.13 Gardu Induk

Gardu Induk adalah bagian dari Sistem Transmisi yang tidak dapat dipisahkan. Penyaluran energi listrik dari pusat – pusat pembangkit menuju ke konsumen memiliki proses dan tahapan yang banyak dan rumit, dimana salah satunya proses tersebut membutuhkan Gardu Induk. Gardu Induk adalah sekumpulan peralatan listrik dengan rating tegangan tinggi yang saling terhubung sedemikian.

*Pout* : Daya listrik keluaran (*Output*) atau daya pada kumparan *sekunder*.

*Pin* : Daya listrik masukan (*Input*) atau daya pada kumparan *primer*.

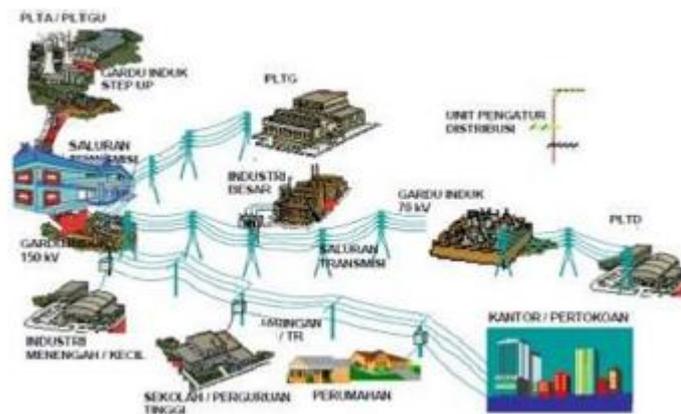
Transformator yang ideal adalah transformator yang memiliki nilai efisiensi 100%, yang berarti transformator tersebut tidak kehilangan daya sama sekali dalam proses transformasi daya dari tegangan tinggi menjadi tegangan menengah. Namun transformator yang ideal ini hampir tidak ada karena adanya faktor rugi – rugi yang terjadi pada transformator, faktor tersebut antara lain dari rugi inti besi atau *core loss* dan faktor rugi dari belitan tembaga atau *copper loss*. Kerugian atau kehilangan daya pada transformator ini disebabkan oleh dua faktor utama tersebut, kerugian daya atau kehilangan daya pada transformator ini disebut juga dengan rugi daya atau *power loss*. [14]

### 2.14 Saluran Transmisi

Transmisi tenaga listrik adalah proses penghantaran tenaga listrik dari pusat - pusat pembangkit listrik ke gardu - gardu listrik. Jalur yang terinterkoneksi untuk memfasilitasi penghantaran ini dikenal sebagai jaringan transmisi listrik. Listrik ditransmisikan pada tegangan tinggi antara 70 kilovolt hingga 500 kilovolt untuk mengurangi hilangnya listrik pada saat dihantarkan dalam jarak yang sangat jauh dan panjang. Listrik biasanya ditransmisikan melalui saluran listrik udara, karena transmisi listrik melalui bawah tanah membutuhkan biaya pemasangan yang lebih besar dan banyak batasan dalam operasionalnya, walaupun biaya perawatannya lebih rendah. Transmisi listrik bawah tanah biasanya digunakan di kawasan perkotaan dan di kawasan dengan lingkungan yang sensitif.[14]

Mahalnya fasilitas penyimpanan energi listrik pada sistem transmisi mengharuskan listrik dibangkitkan sesuai dengan jumlah kebutuhan pada saat itu. Energi listrik tersebut kemudian disalurkan melalui saluran udara atau kabel bawah tanah. Kabel bawah tanah memiliki keunggulan karena tidak memerlukan menara penyangga seperti pada saluran udara, serta lebih tahan terhadap kondisi cuaca

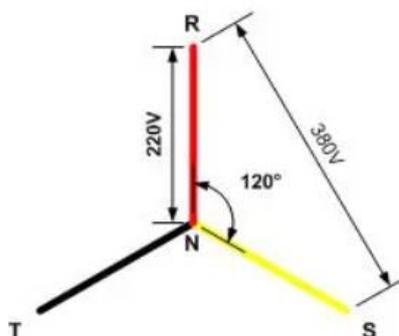
ekstrem, misalnya badai, hujan, maupun sambaran petir. Namun demikian, biaya konstruksi kabel bawah tanah relatif lebih tinggi dibandingkan saluran udara. Selain itu, apabila terjadi gangguan, kerusakan pada kabel bawah tanah lebih sulit dideteksi maupun diperbaiki. Penerapan kabel bawah tanah umumnya dijumpai pada sistem transmisi di kawasan perkotaan, karena keberadaan menara saluran udara dianggap kurang relevan di tengah bangunan tinggi dan padatnya infrastruktur kota.



Gambar 2. 25 Saluran Transmisi Listrik

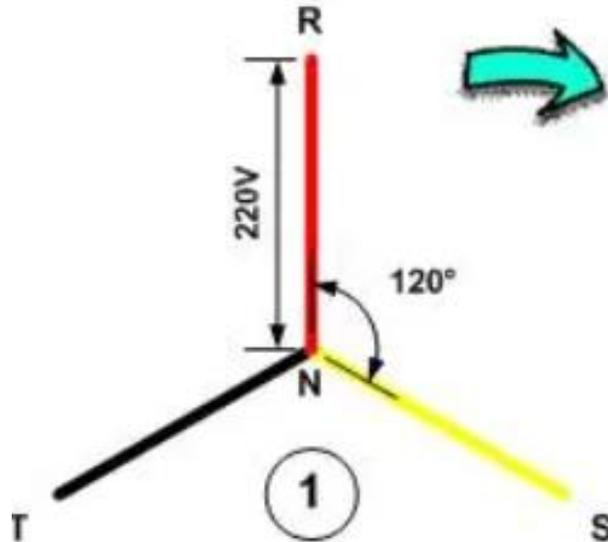
### 2.15 Tegangan Tiga Fasa

Tegangan tiga fasa umumnya direpresentasikan dengan tiga vektor tegangan yang titik pangkalnya berimpit pada satu titik. Setiap vektor tersebut membentuk sudut sebesar  $120^\circ$  terhadap vektor lainnya. Besarnya sudut ini disebut sebagai sudut perbedaan fasa, yaitu selisih sudut antara satu fasa dengan fasa yang lain sebesar  $120^\circ$ . Seperti pada gambar berikut ini :



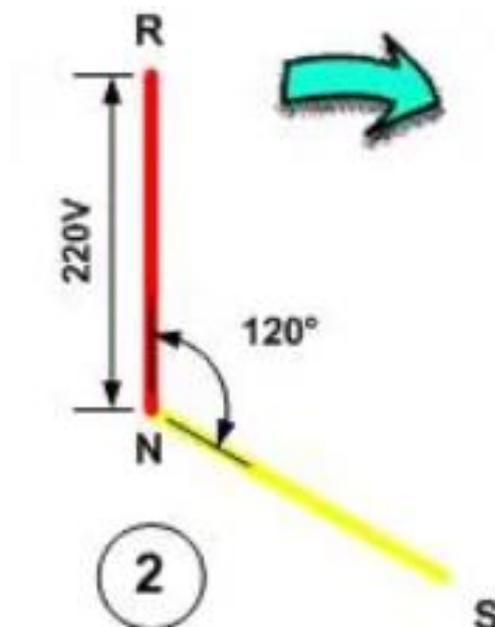
Gambar 2. 26 Tegangan Tiga Fasa

Untuk mencari dari mana datangnya akar tiga, mari kita coba gunakan perhitungan matematika sederhana dengan bantuan gambar sebagai berikut :



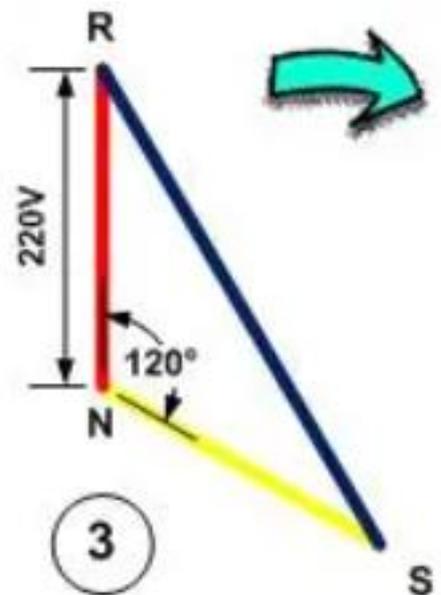
Gambar 2. 27 Vektor Tegangan (R,S,T)

Ditunjukkan tiga buah vektor tegangan (R, S, T) yang masing-masing memiliki nilai 220 V terhadap netral (N).



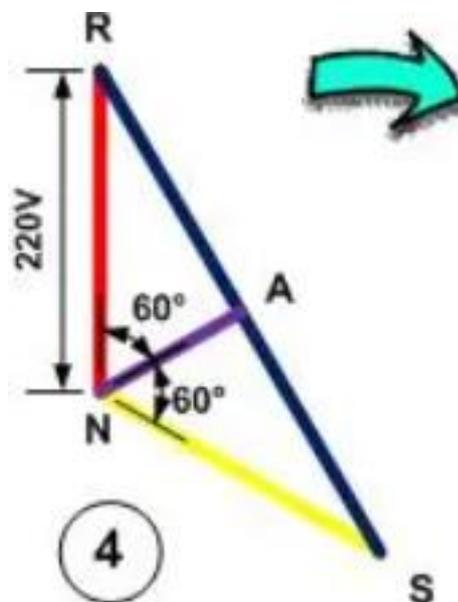
Gambar 2. 28 Tegangan R-N dan S-N

Terlihat bahwa tegangan R-N dan S-N masing-masing 220 V, dengan perbedaan sudut  $120^\circ$ .



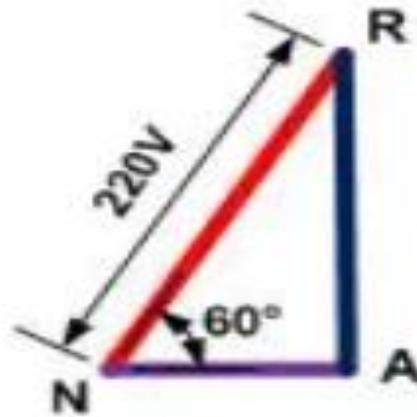
Gambar 2. 29 Segitiga Metode Phasor Diagram

Tegangan R–N dan S–N digambarkan dalam bentuk segitiga (metode *phasor diagram*) dan Dari sini, terlihat bahwa untuk menghitung beda tegangan antara fasa R dan S (tegangan garis R–S), diperlukan konstruksi vektor.



Gambar 2. 30 Sudut  $60^\circ$

Dengan aturan geometri segitiga (aturan kosinus), sudut  $120^\circ$  diubah menjadi segitiga dengan sudut  $60^\circ$  maka terbentuk sisi miring (tegangan R–S = A) yang lebih besar dari tegangan fasa (220 V). Dan Sudut  $60^\circ$  muncul karena sifat vektor tegangan yang berbeda fasa  $120^\circ$  jika dijumlahkan secara grafis.



5

Gambar 2.31 Hasil Akhir Antar Fasa

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tegangan antar fasa (R-S) lebih besar daripada tegangan fasa (R-N atau S-N).

## **BAB III**

### **METODELOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Waktu dan Tempat**

Proses ini mencakup seluruh tahapan, mulai dari persetujuan proposal hingga selesainya penelitian. Lokasi yang dipilih untuk pelaksanaan penelitian adalah PT PLN (PERSERO) UPT BANDA ACEH GARDU INDUK ARUN.

Pemilihan lokasi penelitian didasarkan pada relevansi serta ketersediaannya sebagai objek studi, dengan harapan dapat menyediakan data dan informasi yang mendukung tujuan penelitian secara optimal. Sepanjang periode tersebut, seluruh kegiatan penelitian akan dilaksanakan secara terorganisir, meliputi pengumpulan data, analisis, dan penyusunan laporan akhir.

#### **3.2 Bahan dan Alat**

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi perangkat keras dan lunak yang mendukung proses analisis data serta pengolahan informasi. Peralatan utama yang digunakan adalah laptop sebagai media pengolahan data dan analisis, serta perangkat lunak Microsoft Office yang dimanfaatkan untuk dokumentasi, pembuatan laporan, dan analisis data. Dengan kombinasi alat dan bahan ini, diharapkan proses penelitian dapat berjalan dengan efektif dan efisien.

Selain itu, penelitian ini juga menggunakan data laporan harian transformator setiap trafo di Gardu Induk yang diperoleh dari PT PLN (PERSERO) UPT BANDA ACEH GARDU INDUK ARUN menjadi bahan utama dalam penelitian. Kombinasi alat dan bahan ini dirancang untuk memastikan kelancaran penelitian.

#### **3.3 Prosedur Penelitian**

Penelitian ini dimulai dengan tahap awal berupa identifikasi permasalahan yang menjadi pusat perhatian kajian, kemudian dilanjutkan dengan penerapan sejumlah langkah yang tersusun secara sistematis untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Proses tersebut meliputi tahapan pengumpulan data, analisis, hingga penafsiran hasil. Seluruh prosedur dirancang secara terstruktur agar dapat mencapai hasil penelitian yang selaras dengan tujuan yang telah ditentukan.

### **3.4 Metode Pengumpulan Data**

Penelitian ini menggunakan dua jenis data utama, yaitu data primer dan data sekunder. Berikut adalah rincian masing-masing jenis data beserta metode pengumpulannya.

#### **3.4.1 Data primer**

Data primer merupakan informasi yang didapat secara langsung dari sumber aslinya. Dalam penelitian ini, data primer dikumpulkan melalui observasi langsung di lapangan. Informasi yang dihimpun berfokus pada faktor pengaruh beban tak seimbang dan arus netral serta rugi-rugi daya, khususnya yang terjadi di PT PLN (PERSERO) UPT BANDA ACEH GARDU INDUK ARUN. Pendekatan ini memungkinkan peneliti memperoleh data yang akurat dan relevan langsung dari pihak-pihak yang memiliki kompetensi di bidang tersebut.

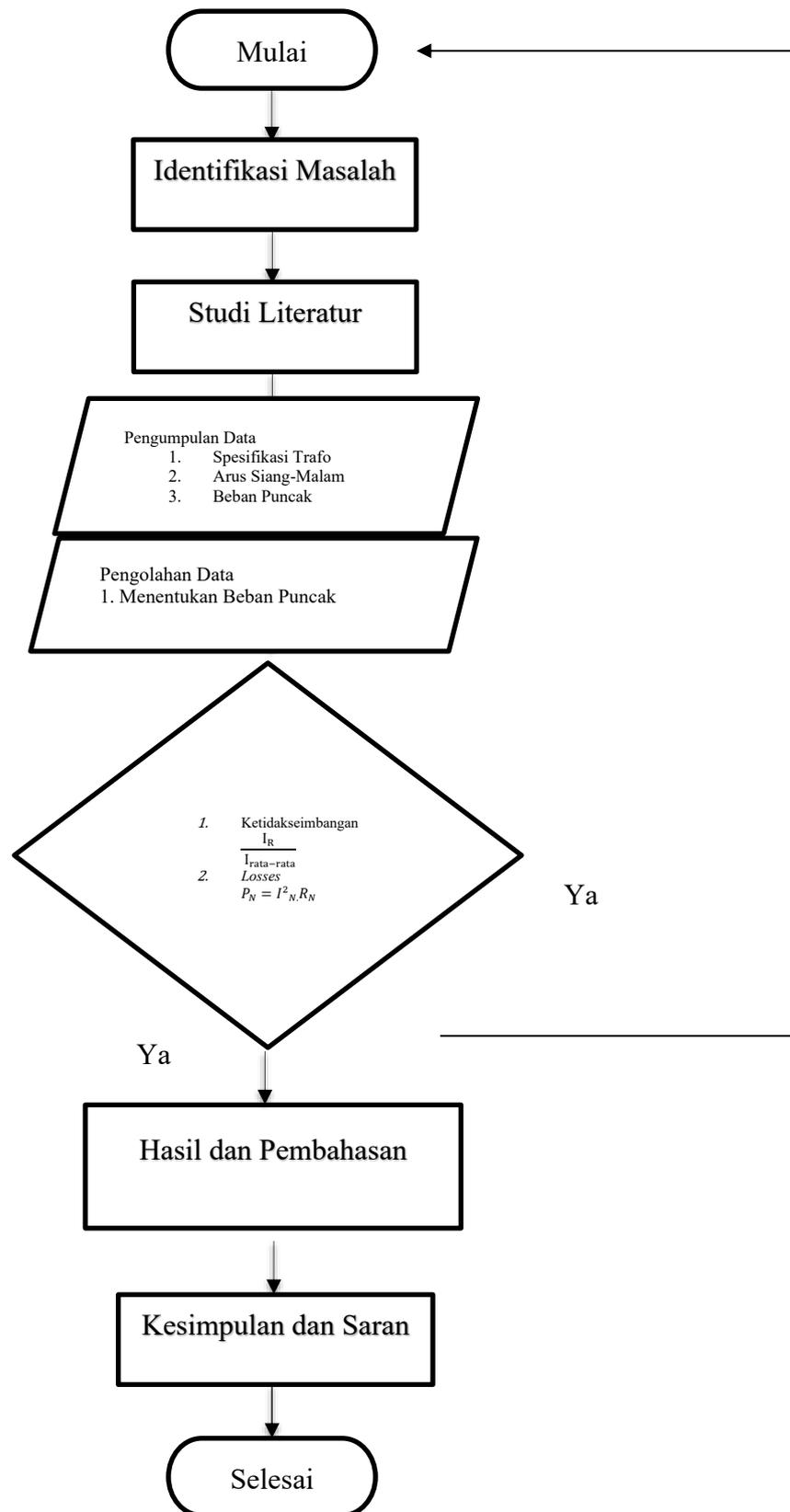
#### **3.4.2 Data Sekunder**

Selain memanfaatkan data primer, penelitian ini juga menggunakan data sekunder yang diperoleh secara tidak langsung dari berbagai referensi. Data sekunder mencakup informasi yang diambil dari buku, jurnal ilmiah, laporan, serta arsip data milik instansi yang relevan. Keberadaan data ini sangat penting sebagai pelengkap data primer, karena membantu peneliti dalam mengenali permasalahan, menyusun kajian pustaka, serta membangun analisis yang lebih menyeluruh.

### **3.5 Sumber Data**

Dalam menyusun proposal ini adalah data yang diperoleh dengan menggunakan observasi pada obyek penelitian lapangan yakni instansi atau lembaga yang terkait dengan obyek penelitian lapangan yaitu pada PT. PLN (PERSERO) UPT BANDA ACEH GARDU INDUK ARUN.

### 3.6 Alur Penelitian



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Rumakat and D. Fauziah, “Analisis Beban Tidak Seimbang Terhadap Arus Netral dan Rugi-Rugi pada Penghantar Netral Transformator di Rayon Baguala Ambon,” *Prosiding Seminar Nasional Energi, Telekomunikasi dan Otomasi SNETO 2021*, pp. 334–345, 2021, [Online]. Available: <https://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/sneto/article/view/748>
- [2] R. Z. Hilmi, R. Hurriyati, and Lisnawati, “ANALISIS PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP ARUS NETRAL DAN RUGI DAYA PADA TRAFODAYA PLN GARDU INDUK BULUKUMBA,” vol. 3, no. 2, pp. 91–102, 2018.
- [3] J. Sentosa Setiadji, T. Machmudsyah, and Y. Isnanto, “Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 7, no. 2, pp. 59–63, 2008, doi: 10.9744/jte.7.2.68-73.
- [4] W. H. PAREIRA, “Analisa Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Kualitas Daya Pada Jaringan Distribusi Radial Di Area Atambua Kabupaten Belu,” *Eprints.Itn*, pp. 5–11, 2016.
- [5] H. Tanamal, A. Herawati, N. Daratha, and I. N. Anggraini, “Analisis Pengaruh Beban Tak Seimbang Terhadap Arus Netral Pada Trafo IV GI Sukamerindu Bengkulu,” *Jurnal Amplifier : Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Elektro Dan Komputer*, vol. 9, no. 2, pp. 7–13, 2019, doi: 10.33369/jamplifier.v9i2.15377.
- [6] P. Jati, “Analisa Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Pada Trafo 30 MVA Gardu Induk 150/20 kV Purwodadi,” pp. 1–51, 2022.
- [7] F. S. M. Soares and G. Budiono, “Analisa Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo Dt50 Di,” *Jurnal Ilmiah Research Student*, vol. 1, no. 3, pp. 455–461, 2022.
- [8] E. S. Nasution, F. I. Pasaribu, and M. H. Hidayat, “Studi Proteksi Sistem Tenaga Listrik Pada Trafo 1600 kVA Menggunakan Current Relay IWU 2-3,” *Jurnal MESIL (Mesin Elektro Sipil)*, vol. 2, no. 2, pp. 28–39, 2021, doi: 10.53695/jm.v2i2.562.
- [9] C. Ariwibowo, “Trafo Distribusi Pada Jaringan Tegangan Menengah 20KV di PT PLN (Persero) UPJ Semarang Selatan,” *Makalah Seminar Kerja Praktek*, pp. 1–8, 2009.
- [10] B. Oktrialdi *et al.*, “Energi Alternatif Menggunakan Radiator Mobil Menghasilkan Power Supply Ac 12 Volt Dan 220 Volt,” *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro*, vol. 6, no. 2, pp. 100–105, 2024, doi: 10.30596/rele.v6i2.17685.
- [11] R. Khomarudin and L. Subekti, “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban dan Harmonisa Terhadap Arus Netral Pada Trafo Distribusi 8 Kapasitas 500 KVA di PPSDM Migas Cepu,”

- Jurnal Listrik, Instrumentasi dan Elektronika Terapan (JuLIET)*, vol. 1, no. 2, pp. 28–33, 2021, doi: 10.22146/juliet.v1i2.59560.
- [12] A. Muhtar, Iwan, Antarissubhi, and Suryani, “Analisis Rugi Daya Jaringan Distribusi Primer PT. PLN ULP Sengkang Sulawesi Selatan,” *Analisis Rugi Daya Jaringan Distribusi Primer PT. PLN ULP Sengkang Sulawesi Selatan*, vol. 33, no. 8.5.2017, pp. 1–85, 2022.
- [13] “MUSTHOPA HUSEIN.pdf.”
- [14] S. Pamungkas, “Analisis Pengaruh Beban Puncak Terhadap Efisiensi Transformator 60 Mva 150/20Kv Unit 1 Dan 2 Di Gardu Induk Kaliwungu,” vol. 50196, pp. 1–5, 2022.

**LAMPIRAN**



Lampiran Gambar 1: PHT 150 Kv Lhokseumawe



Lampiran Gambar 2: PHT 150 Kv Bireun

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP



### DATA DIRI PENULIS

Nama Lengkap : M. Fauzan Aditya  
 Nomor Pokok Mahasiswa : 2107220083  
 Tempat Tanggal Lahir : Rantau, 23 Mei 2002  
 Alamat : Jln. Dusun Cinta Damai, Desa Alur  
 Cucur, Kec. Rantau, Kota Aceh  
 Tamiang, Aceh  
 Agama : Islam  
 Jenis Kelamin : Laki-laki  
 No. Telp : 0822-9885-1904  
 Email : [mfauzanaditya@gmail.com](mailto:mfauzanaditya@gmail.com)

### ORANG TUA

Nama Ayah : Alm.Ridwan  
 Agama : Islam  
 Nama Ibu : Latifah Hanum  
 Agama : Islam  
 Alamat : Jln. Dusun Cinta Damai, Desa Alur  
 Cucur, Kec. Rantau, Kota Aceh  
 Tamiang, Aceh

### RIWAYAT PENDIDIKAN

2008-2014 : SD Swasta Dharma Patra Rantau  
 2014-2017 : SMP Swasta Dharma Patra Rantau  
 2017-2020 : SMA Negeri 1 Kejuruan Muda  
 2021-2025 : S1 Teknik Elektro Universitas  
 Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU)



**UMSU**  
Unggul | Cerdas | Terpercaya

Bila mendapat surat ini agar melakukan  
sesuai dan terpuji

MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN & PENGEMBANGAN PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH

**UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA**  
**FAKULTAS TEKNIK**

UMSU Terakreditasi Unggul Berdasarkan Keputusan Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi No. 174/SK/BAN-PT/Ak.Pgpt/PT/III/2024

Pusat Administrasi: Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6622400 - 66224567 Fax. (061) 6625474 - 6631003

<https://fatek.umsu.ac.id> [fatek@umsu.ac.id](mailto:fatek@umsu.ac.id) [umsumedan](https://www.facebook.com/umsumedan) [umsumedan](https://www.instagram.com/umsumedan) [umsumedan](https://www.youtube.com/umsumedan)

**PENENTUAN TUGAS AKHIR DAN PENGHUIJUKAN**  
**DOSEN PEMBIMBING**

Nomor : 942/HL.3AU/UMSU-07/F/2025

Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, berdasarkan rekomendasi Atas Nama Ketua Program Studi Teknik Elektro Pada Tanggal 04 Juni 2025 dengan ini Menetapkan :

Nama : M. FAUZAN ADITYA  
Npm : 2107220083  
Program Studi : TEKNIK ELEKTRO  
Semester : 8 ( DELAPAN )  
Judul Tugas Akhir : ANALISIS PENGARUH BEBAN TAK SEIMBANG TERHADAP ARUS NETRAL DAN RUGI DAYA PADA TRAF0 PT PLN ( PERSERO ) UPT BANDA ACEH GARDU INDUK ARUN .

Pembimbing : Dr ELVY SAHNUR NASUTION ST.M.Pd .

Dengan demikian diizinkan untuk menulis tugas akhir dengan ketentuan :

1. Bila judul Tugas Akhir kurang sesuai dapat diganti oleh Dosen Pembimbing setelah mendapat persetujuan dari Program Studi Teknik Elektro
2. Menulis Tugas Akhir dinyatakan batal setelah 1 (satu) Tahun dan tanggal yang telah ditetapkan.

Demikian surat penunjukan dosen Pembimbing dan menetapkan Judul Tugas Akhir ini dibuat untuk dapat dilaksanakan sebagaimana mestinya

Medan, 08 Dzulhijjah 1446 H  
04 Juni 2025 M



Munawar Alfansury Siregar, ST.,MT  
NIDN: 0101017202





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

LEMBAR ASISTENSI BIMBINGAN

NAMA : M. FAUZAN ADITYA  
 NPM : 2107220083  
 JUDUL : ANALISIS PENGARUH BEBAN TAK SEIMBANG TERHADAP ARUS NETRAL DAN RUGI DAYA PADA TRAF0 PT PLN (PERSERO) UPT BANDA ACEH GARDU INDUK ARUN

No.	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
1.	08-04-2015	Perbaiki rumusan masalah	#
2.	10-04-2015	Perbaiki toni dan penulisan	#
3.	16-04-2015	Buat metode penelitian	#
4.	06-05-2015	Keyelasan flowchart	#
5.	07-05-2015	Membuat rumus pada flowchart	#
6.	15-05-2015	Menyampaikan Rumusan Masalah dan menyempatkan dengan judul	#
7.	21-05-2015	Perbaiki lagi sistematika penulisan dan nomor rumus.	#
8.	11-06-2015	Perbaiki rumus dan seminar hasil proposal	#

Dosen Pembimbing

Dr. Elvy Sahnur NST, S.T., M.Pd



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA  
FAKULTAS TEKNIK-TEKNIK ELEKTRO

BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR (SKRIPSI)

NAMA : M. FAUZAN ADITYA  
 NPM : 2107220083  
 Fakultas/Jurusan : TEKNIK ELEKTRO  
 Judul Skripsi : ANALISIS PENGARUH BEBAN TAK SEIMBANG TERHADAP ARUS NETRAL DAN RUGI DAYA PADA TRAF0 PT.PLN (Persero) UPT BANDA ACEH GARDU INDUK ARUN

No	Tanggal	Catatan Asistensi	Paraf Pembimbing
1		Perbaiki Analisis Hasil penelitian	
2		Perbaiki penulisan	
3		Perbaiki flowchart	
4		Perbaiki kesimpulan	
5		Acc Sahnur 09/08/25	
6			
7			

Mengetahui  
Dosen Pembimbing

Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T.,M.Pd.



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA  
FAKULTAS TEKNIK-TEKNIK ELEKTRO

BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR (SKRIPSI)

NAMA : M. FAUZAN ADITYA  
 NPM : 2107220083  
 Fakultas/Jurusan : TEKNIK ELEKTRO  
 Judul Skripsi : ANALISIS PENGARUH BEBAN TAK SEIMBANG  
 TERHADAP ARUS NETRAL DAN RUGI DAYA PADA  
 TRAFO PT PLN (PERSERO) UPT BANDA ACEH  
 GARDU INDUK ARUN

No	Tanggal	Catatan Asistensi	Paraf Pembimbing
1		Perbaiki Penulisan, Font, tabel	<i>[Signature]</i>
2		Perbaiki referensi utuh ke IEEE	<i>[Signature]</i>
3		Buat Grafik Pengaruh beban terhadap arus netral dan rugi daya.	<i>[Signature]</i>
4		Rugi Daya.	
5		Aceh Gbang 22/6/25	<i>[Signature]</i>
6			
7			

Mengetahui  
Dosen Pembimbing

*[Signature]*

Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T.,M.Pd.