

**ANALISA KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN  
TERHADAP ARUS NETRAL PADA TRAF0 30 MVA  
GARDU INDUK 150/20 KV PURWODADI**

**TUGAS AKHIR**



**OLEH:**

**NAMA : PUTRANTO JATI**

**NIM : 30601501803**

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

**2022**

**NEUTRAL CURRENT LOAD UNBALANCE ANALYSIS IN THE  
30 MVA PURWODADI 150/20 KV SUBSTATION  
TRANSFORMER**

**THESIS**



**BY:**

**NAME : PUTRANTO JATI**

**NIM : 30601501803**

**ELECTRICAL ENGINEERING STUDY PROGRAM  
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY  
SULTAN AGUNG ISLAMIC UNIVERSITY SEMARANG**

**2022**

## LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISA KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP ARUS NETRAL PADA TRAF0 30 MVA GARDU INDUK 150/20 KV PURWODADI” ini disusun oleh:


Nama : PUTRANTO JATI  
NIM : 30601501803  
Program Studi : Teknik Elektro

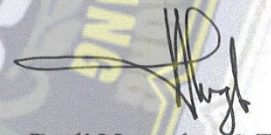
Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Jum'at  
Tanggal : 30 Desember 2022

Pembimbing I

Pembimbing II

  
Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, M.T.  
NIDN : 0618066301

  
Dedi Nugroho, S.T., M.T.  
NIDN : 0617126602

Mengetahui,

Ka. Program Studi Teknik Elektro



Jenny Putri Hapsari, ST., MT.  
NIDN : 0607018501



## LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

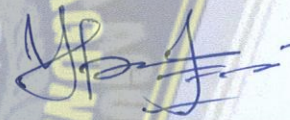
Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISA KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP ARUS NETRAL PADA TRAF0 30 MVA GARDU INDUK 150/20 KV PURWODADI” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Jum'at  
Tanggal : 30 Desember 2022

Tim Penguji

Tanda Tangan

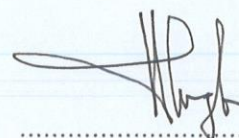
Ir. Ida Widiastuti, M.T.  
NIDN : 0005036501  
Ketua



Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, M.T.  
NIDN : 0618066301  
Penguji I



Dedi Nugroho, S.T., M.T.  
NIDN : 0617126602  
Penguji II



## SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Putranto Jati  
NIM : 30601501803  
Jurusan : Teknik Elektro  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **“ANALISA KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP ARUS NETRAL PADA TRAFU 30 MVA GARDU INDUK 150/20 KV PURWODADI”** adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam daftar pustaka. Tugas Akhir ini adalah milik saya segala bentuk kesalahan dan kekeliruan dalam Tugas Akhir ini adalah tanggung jawab saya.

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

Semarang, 30 Desember 2022

Yang Menyatakan



Putranto Jati



## PERNYATAAN PERSETUJUAN UNGGAH KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : PUTRANTO JATI

NIM : 30601501803

Program Studi : TEKNIK ELEKTRO

Fakultas : TEKNOLOGI INDUSTRI

Dengan ini menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir/Skripsi/Tesis/Disertasi\* dengan judul : "**ANALISA KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP ARUS NETRAL PADA TRAF0 30 MVA GARDU INDUK 150/20 KV PURWODADI**" dan menyetujuinya menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif untuk disimpan, dialihmediakan, dikelola dalam pangkalan data, dan dipublikasikannya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung.

Semarang, 30 Desember 2022

Yang menyatakan,



(Putranto Jati)

\*Coret yang tidak perlu

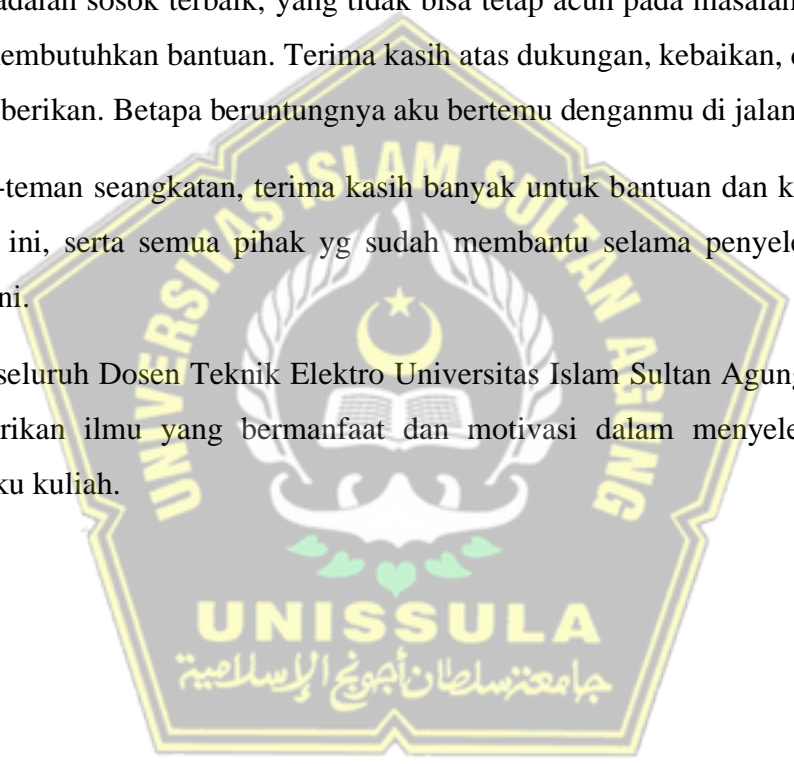
## HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas Akhir ini saya persembahkan untuk kedua Orang Tua saya yang selalu memotivasi dan selalu menyirami kasih sayang, selalu mendoakanku, selalu menasehatiku menjadi lebih baik. Terima kasih Ibu, terima kasih Ayah atas semua yang telah engkau berikan semoga diberi kesehatan dan panjang umur.

Kepada istri saya **Cahyaning Mentari**, orang paling istimewa dalam hidupku. Kamu adalah sosok terbaik, yang tidak bisa tetap acuh pada masalah orang-orang yang membutuhkan bantuan. Terima kasih atas dukungan, kebaikan, dan perhatian yang diberikan. Betapa beruntungnya aku bertemu denganmu di jalan hidupku.

Teman-teman seangkatan, terima kasih banyak untuk bantuan dan kerja samanya selama ini, serta semua pihak yg sudah membantu selama penyelesaian Tugas Akhir ini.

Untuk seluruh Dosen Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung yang selalu memberikan ilmu yang bermanfaat dan motivasi dalam menyelesaikan studi dibangku kuliah.



## HALAMAN MOTTO

Tidak ada satu pun perjuangan yang tidak melelahkan.

*“Dan berikanlah berita gembira kepada orang-orang yang sabar, yaitu yang ketika ditimpa musibah mereka mengucapkan: sungguh kita semua ini milik Allah dan sungguh kepadaNya lah kita kembali”.*

*(QS Al-Baqarah: 155-156)*

Pantang dalam menyerah, pantang dalam berpatah arang.

Tidak ada kata gagal untuk orang yang enggan berhasil.

*“Dan janganlah kamu berputus asa dari rahmat Allah. Sesungguhnya tiada berputus dari rahmat Allah melainkan orang-orang yang kafur”.*

*(QS Yusuf: 87)*

Tidak ada kesulitan yang tidak ada ujungnya.

Sesudah sulit pasti akan ada kebahagiaan.

*“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan. Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.”*

*(QS Al-Insyirah: 5-6)*

*“Jika kamu berbicara tentang apa yang tidak penting bagimu, maka kamu telah diperdaya kalimat itu padahal kamu tidak mendapat manfaatnya.”*

*(Imam Syafi’i)*

*“Angin tidak berhembus untuk menggoyangkan pepohonan, melainkan menguji kekuatan akarnya.”*

*(Ali bin Abi Thalib)*



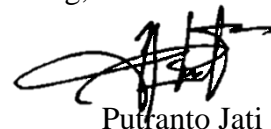
## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur sudah sepatutnya kita panjatkan kehadirat Illahi Robbi, karena atas hidayah dan taufik-Nya penulis masih diberikan kesempatan untuk melaksanakan segala aktivitas, niat dan rencana. Shalawat serta salam semoga terlimpah kepada Nabi Muhammad SAW, keluarga, sahabat dan umatnya hingga akhir zaman.

Alhamdulillah atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul “**ANALISA KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP ARUS NETRAL PADA TRAF0 30 MVA GARDU INDUK 150/20 KV PURWODADI**”. Oleh karena itu, dengan rasa tulus dan ikhlas, penulis ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada yang terhormat :

1. Bapak Prof. Gunarto SH., MHum., selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung
2. Ibu Jenny Putri Hapsari, ST., MT., selaku ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung
3. Bapak. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, MT, selaku pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan arahan dalam penyusunan skripsi ini.
4. Bapak Dedi Nugroho, ST., MT., selaku pembimbing II yang telah memberikan bimbingan dan arahan dalam penyusunan skripsi ini.
5. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Elektro Universitas Sultan Agung yang telah memberikan bimbingan dan wawasan keilmuan kepada penulis.
6. Kedua orang tua yang senantiasa memotivasi dan mendoakan penulis selama menjalani studi dan penyusunan skripsi ini.
7. Istriku tercinta yang telah banyak memberi dorongan dan bantuan kepada penulis untuk menyelesaikan studi ini.
8. Buat semua kawan-kawan yang belum sempat disebutkan nama-namanya, terima kasihku untukmu semuanya.

Semarang, 30 Desember 2022



Putranto Jati

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	iii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iv
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH.....	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
HALAMAN MOTTO.....	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
ABSTRAK.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Pembatasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Manfaat.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	5
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Landasan Teori.....	7
2.2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	7

2.2.2 Ketidakseimbangan Beban.....	8
2.2.3 Tipe-Tipe Beban.....	11
2.2.4 Beban Tidak Normal.....	11
2.2.5 Arus Netral.....	12
2.2.6 Distribusi Daya.....	12
2.2.7 Sistem Distribusi Tenaga Listrik.....	12
2.2.8 Penyaluran Primer Tipe Radial.....	13
2.2.9 Penyaluran Primer Tipe Loop.....	13
2.2.10 Primary Network.....	14
2.2.11 Faktor Daya.....	14
2.2.12 Faktor Daya Tertinggal.....	15
2.2.13 Faktor Daya Mendahului.....	15
2.2.14 Trafo.....	16
2.2.15 Trafo Sistem Daya.....	17
2.2.16 Trafo Tiga Fasa.....	17
2.2.17 Konstruksi Trafo Tiga Fasa.....	18
2.2.18 Kumparan Trafo Tiga Fasa.....	19
2.2.19 Jenis-Jenis Hubungan Trafo Tiga-Fasa.....	19
2.2.20 Vektor Grup.....	24
2.2.21 Perhitungan Arus Beban Penuh Trafo.....	29
2.2.22 Ketidakseimbangan Tegangan.....	30
2.2.23 Software E-TAP.....	30
<b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>	<b>33</b>
3.1 Model Penelitian.....	33
3.2 Tahap Penelitian.....	33

3.2.1 Studi Pustaka.....	33
3.2.2 Metode Wawancara.....	34
3.2.3 Metode Observasi.....	34
3.2.4 Simulasi Penelitian.....	34
3.2.5 Data .....	35
3.3 Model E-TAP 12.6.0 .....	39
3.4 Pemodelan E-TAP 12.6.0 .....	40
3.5 Prosedur Penelitian.....	42
<b>BAB IV HASIL DAN ANALISA .....</b>	<b>43</b>
4.1 Hasil.....	43
4.1.1 Simulasi Ketidakseimbangan Sebelum Penyeimbangan Beban .....	43
4.1.2 Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan Beban Sebelum Penyeimbangan Beban.....	44
4.1.3 Perhitungan Rugi-rugi Sebelum Penyeimbangan Beban .....	45
4.1.4 Simulasi Aliran Daya Tak Seimbang Sesudah Penyeimbangan Beban.....	45
4.1.5 Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan Beban Sesudah Penyeimbangan Beban.....	48
4.1.6 Perhitungan Rugi-rugi Sesudah Dilakukan Penyeimbangan Beban ....	48
4.2 Analisa.....	49
<b>BAB V KESIMPULAN .....</b>	<b>50</b>
5.1 Kesimpulan.....	50
5.2 Saran.....	50
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>51</b>



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3. 1</b> Data Pembebanan Trafo Distribusi PWI09 .....	36
<b>Tabel 3. 2</b> Data Beban Harian Pukul 10.00 .....	38
<b>Tabel 4. 1</b> Report Manager E-TAP 12.6.0 sebelum penyeimbangan beban .....	43
<b>Tabel 4. 2</b> Data Pemindahan Fasa .....	47
<b>Tabel 4. 3</b> Report Manager ETAP 12.6.0 sesudah penyeimbangan beban .....	47



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Sistem Tenaga Listrik [7] .....	7
<b>Gambar 2. 2</b> Vektor Diagram Arus Keadaan Keadaan Seimbang [13].....	9
<b>Gambar 2. 3</b> Vektor Diagram Arus Keadaan Tidak Seimbang [13] .....	10
<b>Gambar 2. 4</b> Faktor Daya .....	14
<b>Gambar 2. 5</b> Arus tertinggal dari tegangan sebesar $\phi$ .....	15
<b>Gambar 2. 6</b> Arus mendahului tegangan sebesar $\phi$ .....	15
<b>Gambar 2. 7</b> Hukum Lorenz [16] .....	16
<b>Gambar 2. 8</b> Arus Bolak-balik Mengelilingi Inti Besi [16].....	16
<b>Gambar 2. 9</b> Konstruksi Trafo Tiga-fasa Tipe Inti [11] .....	18
<b>Gambar 2. 10</b> Trafo Tiga-fasa Tipe Cangkang [11].....	18
<b>Gambar 2. 11</b> Hubungan Y-Y Dalam Sistem Tiga Kawat [11].....	20
<b>Gambar 2. 12</b> Hubungan D-D [11].....	22
<b>Gambar 2. 13</b> Hubungan Y-D [11].....	23
<b>Gambar 2. 14</b> Hubungan D-Y [11].....	24
<b>Gambar 2. 15</b> Vektor Grup Sisi Primer Y dan D [11].....	25
<b>Gambar 2. 16</b> Vektor Grup Sisi Sekunder Y dan D [11].....	25
<b>Gambar 2. 17</b> Jam Untuk Perbedaan Sudut Vektor Grup [11].....	26
<b>Gambar 2. 18</b> Konfigurasi Trafo Tiga-fasa Hubung YD [11].....	26
<b>Gambar 2. 19</b> Trafo Tiga-fasa Hubung; a. YY b. DD c. DY d. YZ [11] .....	27
<b>Gambar 2. 20</b> Vektor Grup Trafo Tiga-fasa Hubung YY [11].....	27
<b>Gambar 2. 21</b> Vektor Grup Trafo Tiga-fasa Hubung DD [11].....	28
<b>Gambar 2. 22</b> Vektor Grup Trafo Tiga-fasa Hubung DY [11].....	28
<b>Gambar 2. 23</b> Vektor Grup Trafo Tiga-fasa Hubung YZ [11] .....	29
<b>Gambar 2. 24</b> Icon E-TAP [15] .....	31
<b>Gambar 3. 1</b> Model Penelitian.....	33
<b>Gambar 3. 2</b> Single Line Diagram Penyulang PWI09 .....	36
<b>Gambar 3. 3</b> Pemodelan Etap 12.6.0 .....	41
<b>Gambar 3. 4</b> Flow Chart .....	42
<b>Gambar 4. 1</b> Sebelum Pemindahan Fasa .....	46
<b>Gambar 4. 2</b> Sesudah Pemindahan Fasa.....	46

## ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui solusi terhadap pengaruh ketidakseimbangan beban yang menyebabkan munculnya rugi-rugi daya, mengetahui rugi-rugi daya dengan pemindahan pembebanan fasa pada trafo untuk mengurangi ketidakseimbangan beban, dan untuk mengetahui simulasi pengaruh ketidakseimbangan beban dengan rekayasa keandalan dengan menggunakan software E-TAP 12.6.0. Metode penelitian ini yang digunakan nantinya akan digunakan pada simulasi E-TAP 12.6.0 untuk mengetahui ketidakseimbangan beban pada Trafo 30 MVA 150/20 kV.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa (1) Pembebanan tidak seimbang menyebabkan munculnya aliran arus netral pada penghantar netral yang menyebabkan rugi-rugi daya akibat arus netral tersebut, semakin besar ketidakseimbangan beban maka semakin besar rugi-rugi daya akibat arus netral (2) Persentase ketidakseimbangan beban Trafo 3 Gardu Induk Purwodadi melebihi standar yang ditetapkan oleh PLN, sehingga perlu adanya penyeimbangan pembebanan untuk mendapatkan presentase ketidakseimbangan yang sesuai standar ketetapan PLN (3) Hasil analisis ketidakseimbangan beban dengan E-TAP 12.6.0 membuktikan adanya arus netral yang muncul, simulasi penyeimbangan pembebanan dengan E-TAP 12.6.0 yang menunjukkan rugi-rugi daya akibat arus netral dapat diperkecil dengan membuat rekonfigurasi jaringan dengan cara pemindahan beban tiap fasa.

**Kata Kunci : Ketidakseimbangan beban, Arus Netral, Trafo 30 MVA, Gardu Induk 150/20 Kv**

## ABSTRACT

The research aims to know the solution to the effect of the weight imbalance that caused the power outage, to know power losses with the transfer of fasa imposes on transformer to reduce weight imposition, and to identify the imposition of weight imbalance by engineering reliability software e-tap 12.6.0. This method of research will then be used in e-tap 12.6.0 simulations to see the weight imbalance in trafo 30 mva 150/20 kv.

Research shows that (1) imbalanced imposition causes a neutral stream of flows to a neutral conductor that causes the power outflow of the neutral current, the greater the load imbalance the 3 purwodadi carrier weight imbalance (2) exceeds the standard set by the PLN, Thus, the need for a balance of burden to get the undaxy-by-pln presentation (3) from an analysis of the load imbalance with e-tap 12.6.0 proves that the neutral current is in place, the simulation of the imposition with e-tap 12.6.0 that shows the power loss of a neutral current can be reduced by creating network reconfiguration by the way the load transposes each unit.

**Key words:** Weight imbalance, neutral currents, trafo 30 mva, 150/20 kv master line



# BABI

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dimasa sekarang kebutuhan listrik semakin meningkat sejalan dengan berkembangnya teknologi dan juga pertumbuhan penduduk. Seiring dengan perkembangan tersebut maka dituntut adanya sarana dan prasarana yang mendukung seperti tersedianya tenaga listrik. Saat ini kebutuhan listrik sangat tinggi, karena teknologi yang menggunakan listrik semakin berkembang, masyarakat di rumah, perusahaan dan industri secara tidak langsung bergantung pada listrik. Catu daya yang berkelanjutan dan stabil merupakan syarat mutlak untuk memenuhi kebutuhan daya.

Sistem distribusi di Jawa Tengah menggunakan sistem 3 fasa 4 kawat yang terdiri dari kabel 3 fasa dan satu kabel netral. Kabel netral dan ground terhubung langsung ke seluruh jaringan. Struktur jaringan yang terdiri dari jalur utama memiliki jalur cabang tiga fase empat kabel atau satu fase dua kabel. Keuntungan menggunakan saluran ini terkait investasi adalah lebih menguntungkan. Namun, ini menyebabkan ketidakseimbangan beban pada jaringan 3 fase. Ini karena setiap fase menunjukkan evolusi beban yang berbeda dari waktu ke waktu dan seiring dengan perkembangan area. Setiap ketidakseimbangan beban pada setiap fasa (fasa R, fasa S, fasa T) menyebabkan arus pada penghantar netral, dan arus netral ini menyebabkan kerugian pada transformator, sehingga mengurangi kemampuannya dalam menangani beban yang ada.

Pengukuran beban penyulang PWI 09 di TRAFO 30 MVA GARDU INDUK 150/20 KV PURWODADI menunjukkan ketidakseimbangan beban antara fasa R, S, dan T yang mengakibatkan terjadinya arus netral yang cukup tinggi. Ketidakseimbangan beban tersebut secara tidak langsung menyumbang kerugian pada pihak PLN selaku produsen listrik tanah air. Untuk memperkecil arus netral yang dihasilkan, diperlukan suatu cara untuk mengurangi beban yang tidak seimbang tersebut. Yaitu dengan membagi beban dalam jaringan tiga fasa, yang dilakukan dengan memindahkan saluran cabang satu fasa. Proses *load balancing* di

PT. PLN (Persero) dilakukan secara manual dengan memindahkan taping dari fasa satu ke fasa lain dengan beban ringan.

Merujuk permasalahan tersebut, maka pada Tugas Akhir ini penulis membahas tentang Analisa Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Pada TRAFO 30 MVA GARDU INDUK 150/20 kV PURWODADI. Sebagai obyek penelitian diambil data dari penyulang PWI 09 TRAFO 30 MVA GARDU INDUK PURWODADI. Seiring dengan *software engineering* yang semakin berkembang, maka dipilihlah *software* E-TAP 12.6.0 untuk membantu dalam perhitungan dan analisa.

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan berdasarkan pengamatan yang dilakukan, dapat diurutkan permasalahan yang dihadapi antara lain:

- a. Bagaimana fluktuasi beban menyebabkan ketidakseimbangan yang berpengaruh terhadap munculnya arus netral yang besar.
- b. Semakin besar arus netral yang muncul dapat menyebabkan rugi-rugi daya, maka perlu dieliminir besarnya ketidakseimbangan beban.

## 1.3 Pembatasan Masalah

Karena ruang lingkup masalah yang sangat luas dan banyaknya hal-hal yang perlu diperhatikan dalam evaluasi ini, maka penulis memberikan beberapa batasan masalah antara lain:

- a. Data beban berdasarkan pengukuran beban Trafo distribusi dilapangan pada saat beban puncak.
- b. Perhitungan besar arus netral dengan *software* E-TAP 12.6.0.
- c. Perhitungan persentase pembebanan pada TRAFO 30 MVA 150/20 kV.
- d. Perhitungan rugi-rugi arus netral akibat ketidakseimbangan beban.

## 1.4 Tujuan

Adapun tujuan dalam penulisan laporan akhir ini, adalah:

- a. Mengetahui solusi terhadap pengaruh ketidakseimbangan beban yang menyebabkan munculnya rugi-rugi daya.

- b. Mengetahui rugi-rugi daya dengan pemindahan pembebanan fasa pada Trafo untuk mengurangi ketidakseimbangan beban.

### 1.5 Manfaat

Adapun manfaat dalam penulisan laporan akhir ini, adalah:

- a. Dapat mengetahui solusi terhadap pengaruh ketidakseimbangan beban yang menyebabkan munculnya rugi-rugi daya.
- b. Dapat mengetahui rugi-rugi daya dengan pemindahan pembebanan fasa pada Trafo untuk mengurangi ketidakseimbangan beban.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Tugas Akhir terbagi menjadi 5 bab, dengan masing-masing bab terdiri dari.

#### **BAB I: PENDAHULUAN**

Bab Pendahuluan berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat dari tugas akhir serta sistematika penulisan laporan.

#### **BAB II: TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI**

Bab 2 membahas mengenai konsep serta prinsip dasar yang diuraikan secara relevan dengan topik dan subjek penelitian yang diperlukan untuk memecahkan masalah penelitian dan untuk merumuskan hipotesis yang ada.

#### **BAB III: METODE PENELITIAN**

Pada Metode Penelitian ini menguraikan secara rinci pemodelan sistem yang digunakan dalam penelitian, menggunakan E-TAP 12.6.0, data penelitian dan flow chart yang digunakan.

#### **BAB IV: HASIL DAN ANALISA**

Bab yang membahas tentang analisa hasil simulasi pemodelan E-TAP 12.6.0 dan dicari perubahan yang terjadi untuk mencari solusi pada penelitian yang dilakukan.

#### **BAB V: KESIMPULAN**

Bab terakhir berisi tentang kesimpulan dari penyusunan laporan selama pembuatan tugas akhir ini. Kesimpulan berisi tentang hasil analisa.





## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Berikut ini beberapa studi literatur sebagai referensi penulis, sebagai berikut:

- a. Beban tidak seimbang pada sistem distribusi terjadi akibat beban satu fasa pada jaringan tegangan rendah. Pada April 2016, tingkat ketidakseimbangan beban di Transformator 1 GI Sronдол adalah 5,2% hingga 8,0%. Karena ketidakseimbangan beban ini, kerugian netral dan arus muncul di kawat netral transformator dan meningkatkan suhu oli dan suhu belitan transformator. Nilai loss maksimal sebelum load balancing adalah 233,1 Watt. Setelah dilakukan *load balancing* dengan E-TAP 12.6.0 didapatkan nilai *loss* tertinggi sebesar 0,17 Watt. Temperatur oli dan temperatur belitan trafo sebelum penyeimbangan beban, nilai tertinggi adalah 50°C dan 62°C. Setelah dilakukan penyeimbangan beban, temperatur oli dan koil tertinggi adalah 42,44°C dan 45,9°C [1].
- b. Terjadi ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi tenaga listrik dan penyebab ketidakseimbangan ini adalah beban satu fasa pada pelanggan jaringan tegangan rendah. Karena beban yang tidak seimbang, arus muncul di netral transformator. Arus yang mengalir melalui kawat netral trafo ini menimbulkan rugi-rugi akibat adanya arus netral pada kawat netral trafo dan rugi-rugi akibat arus netral yang mengalir ke bumi. Hasil analisis menunjukkan bahwa jika ketidakseimbangan beban besar 28,68%, arus netral yang muncul juga 118,6 A dan kerugian akibat arus netral yang diarahkan ke tanah bahkan lebih besar dari 8,62% [2].
- c. Terjadi ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi tenaga listrik dan penyebab ketidakseimbangan ini adalah beban satu fasa pada pelanggan jaringan tegangan rendah. Karena ketidakseimbangan beban

ini, arus muncul di netral transformator. Hasil analisis menunjukkan bahwa setelah dilakukan penyeimbangan beban, nilai arus netral pada kawat netral trafo dan arus netral yang menuju ke tanah lebih kecil, sehingga rugi-rugi yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan arus netral sebelum dilakukan pekerjaan penyeimbangan [3].

- d. Perhitungan besarnya ketidakseimbangan beban Trafo dibutuhkan untuk mengantisipasi terjadinya beban lebih pada Trafo akibat penambahan beban listrik yang tidak memperhatikan ketidakseimbangan. Setelah dilakukan perhitungan dan simulasi diperoleh hasil persentase pembebanan tertinggi sebesar 127,03% pada Trafo ML227, dan rugi-rugi jaringan tegangan rendah yaitu sebesar 1,0 kW dan 13,0 kVAR pada Trafo ML059, serta ada tiga Trafo yang diidentifikasi berbeban lebih yaitu ML059, ML354, dan ML425 [4].
- e. Ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi tenaga listrik selalu terjadi dan penyebab ketidakseimbangan tersebut adalah beban satu fasa pada jaringan tegangan rendah pelanggan. Karena ketidakseimbangan beban ini, arus muncul di netral transformator. Arus yang mengalir pada netral trafo ini menimbulkan rugi-rugi dan rugi-rugi akibat arus netral yang mengalir ke tanah. Setelah dilakukan analisis, ditemukan bahwa jika terjadi ketidakseimbangan beban yang signifikan, arus netral juga signifikan dan kerugian akibat arus netral yang mengalir ke tanah semakin besar [5].
- f. Listrik merupakan kebutuhan pokok bagi kehidupan masyarakat saat ini. Penelitian ini akan menganalisis ketidakseimbangan beban yang terjadi di PT. PLN Rayon Blora. Menurut perhitungan, tingkat ketidakseimbangan beban adalah 25,68% pada siang hari dan 16,34% pada malam hari. Loss akibat adanya arus netral yang mengalir pada kabel netral juga dicapai sebesar 7,12 kW dan persentase 4,45% pada siang hari, sedangkan pada malam hari sebesar 7,40 kW dan persentase 4,63%. Studi ini juga menghitung rugi-rugi yang diakibatkan oleh arus netral yang mengalir ke tanah sebesar 8,90 kW dan persentasenya

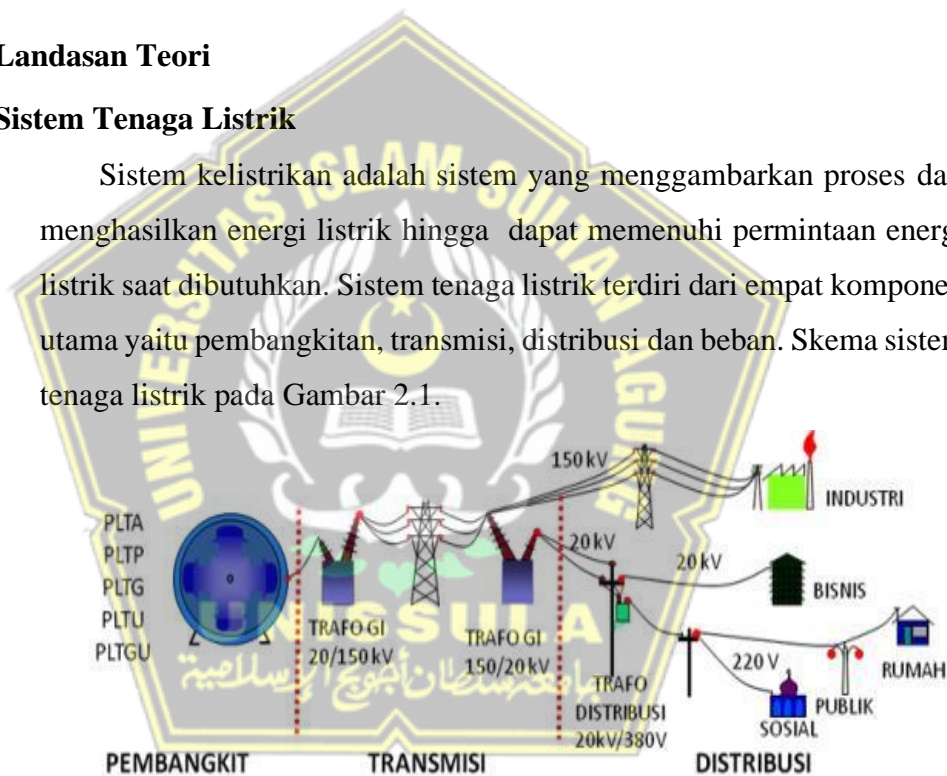
menjadi 5,56% pada siang hari, sedangkan pada malam hari sebesar 8,27 kW dan persentase sebesar 5,17% [6].

Berdasarkan beberapa referensi studi literatur tersebut perbedaan dari penelitian ini adalah, objek penelitian yang digunakan di Gardu Induk Purwodadi, penelitian yang dibahas yaitu pada Trafo 30 MVA Gardu Induk 150/20 kV, penelitian menggunakan simulasi *software* E-TAP 12.6.0 untuk mencari arus netral dan ketidakseimbangan beban Trafo.

## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem kelistrikan adalah sistem yang menggambarkan proses dari menghasilkan energi listrik hingga dapat memenuhi permintaan energi listrik saat dibutuhkan. Sistem tenaga listrik terdiri dari empat komponen utama yaitu pembangkitan, transmisi, distribusi dan beban. Skema sistem tenaga listrik pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik [7]

Gambar 2.1 menjelaskan bahwa sistem tenaga listrik diawali dengan pembangkitan, transmisi, distribusi dan beban. Fungsi dari tiga hal tersebut adalah.

#### 1. Pembangkit

Pembangkitan adalah proses konversi energi lainnya menjadi energi listrik. Listrik yang dihasilkan oleh generator digerakkan oleh beberapa jenis energi, yaitu air, batu bara, panas bumi, angin, dll.

Untuk sistem produksi, level tegangan disesuaikan dengan spesifikasi generator yang digunakan, antara 11 sampai 24 kV. Energi listrik yang dihasilkan oleh generator akan dinaikkan oleh trafo step up untuk saluran ke dalam sistem transmisi [7].

#### 2. Transmisi

Transmisi adalah bagian dari sistem kelistrikan, yaitu penghantar terpasang yang membentang sepanjang pusat pembangkitan tenaga sampai ke beban. Fungsi transmisi adalah untuk mendistribusikan daya. Transmisi memerlukan efisiensi yang tinggi agar tidak kehilangan daya yang banyak, sehingga tegangan distribusi harus lebih tinggi untuk mengurangi kehilangan daya [7].

#### 3. Distribusi

Setelah pendistribusian selesai, tegangan kembali diturunkan sesuai kebutuhan dan disalurkan ke gardu induk. Jaringan distribusi selama beroperasi tidak lepas dari gardu induk distribusi di ujung saluran transmisi dan berfungsi untuk mengatur tegangan transmisi [7].

#### 4. Beban

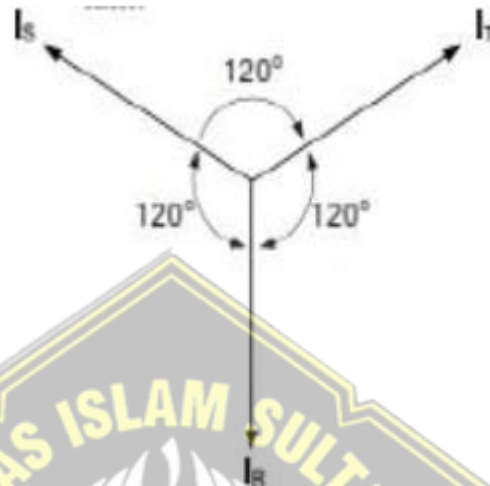
Beban adalah peralatan listrik yang melayani konsumen dengan menggunakan energi listrik. Beban konsumen dibagi menurut beberapa klasifikasi tegangan yaitu konsumen tegangan rendah (KTR), konsumen tegangan menengah (KTM) dan konsumen tegangan tinggi (KTT) [7].

### 2.2.2 Ketidakseimbangan Beban

Beban yang tidak seimbang disebabkan oleh beban fase tunggal pada pelanggan jaringan tegangan rendah. Arus muncul di konduktor netral trafo sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban. Arus yang mengalir pada penghantar netral transformator menyebabkan rugi-rugi. Yaitu rugi-rugi akibat arus netral pada netral trafo dan rugi-rugi akibat arus netral yang mengalir ke bumi [13].

Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana:

- a. Ketiga vektor arus/tegangan adalah sama besar.
- b. Ketiga vektor saling membentuk sudut  $120^{\circ}$  satu sama lain, seperti yang terlihat pada Gambar 2.2.



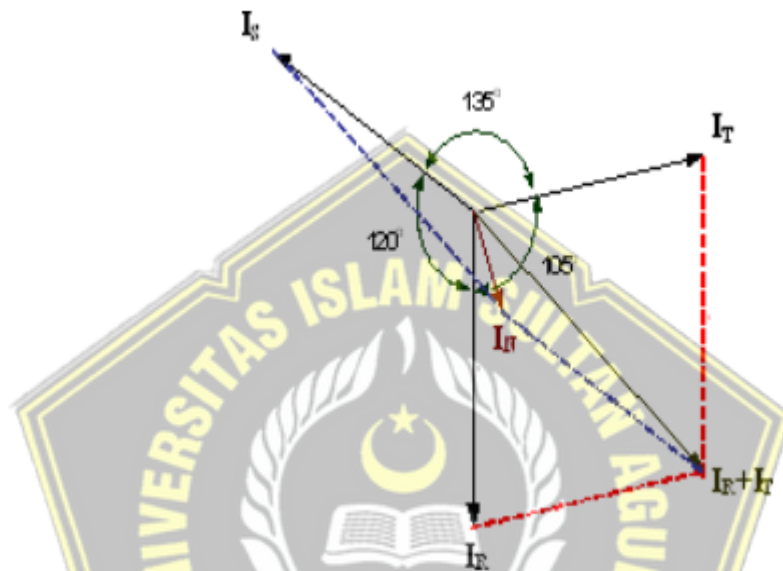
**Gambar 2. 2** Vektor Diagram Arus Keadaaan Keadaan Seimbang [13]

Gambar 2.2 menunjukkan diagram vektor arus dalam kesetimbangan. Dengan menggunakan resistor beban tiga fasa dengan besaran yang sama, arus saluran dengan besaran  $I_R$  akan mengalir melalui setiap elemen ketika salah satu titik fasa dari saluran dihubungkan ke resistor beban masing-masing. Beban terhubung bintang bersifat simetris, sehingga ketiga konduktor atau arus fasanya sama. Oleh karena itu, untuk beban simetris, kabel netral tidak diberi energi. Sistem 4-kawat ini dapat disederhanakan menjadi sistem  $I_R$ - $I_S$ - $I_T$  3-kawat karena kabel netral tidak diberi energi [13]. Ini hanya mungkin jika ada beban yang seimbang. Ini berarti semua tahanan beban sama dan sistem sumber seimbang atau memadai. Di sini kita dapat melihat bahwa jumlah dari tiga vektor arus ( $I_R$   $I_S$   $I_T$ ) sama dengan nol, membentuk sudut. Oleh karena itu, tidak ada arus netral yang muncul. Ada tiga kemungkinan kondisi tidak seimbang:

1. Ketiganya berukuran sama tetapi tidak membentuk sudut satu sama lain.



2. Ketiganya tidak sama besar dan membentuk sudut  $120^0$  satu sama lain.
3. Ketiganya tidak sama besar dan tidak membentuk sudut  $120^0$  satu sama lain.



*Gambar 2.3 Vektor Diagram Arus Keadaan Tidak Seimbang [13]*

Gambar 2.3 menunjukkan bahwa diagram arus vektor tidak seimbang. Di sini kita dapat melihat bahwa jumlah dari tiga vektor arus ( $I_R$   $I_S$   $I_T$ ) tidak sama dengan nol. Oleh karena itu, muncul besaran ( $I_N$ ) yang besarnya bergantung pada besarnya faktor ketidakseimbangan [13].

Tanda-tanda ketidakseimbangan terlihat pada arus netral, tetapi seharusnya tidak ada. Kita juga dapat melihat bahwa urutan fasa tidak searah jarum jam dan arus fasa tidak sama. Perhatikan bahwa ketiga vektor tidak membentuk sudut  $120^0$ . Penyebab ketidakseimbangan beban adalah:

- Pembebanan sistem distribusi yang tidak merata.
- Beban tidak merata dalam sistem tenaga listrik.
- Distribusi beban per fasa yang tidak merata.

- Peralatan jaringan listrik mengalami kerusakan seperti kapasitor bank yang terbakar, transformator terbakar, hubungan *open delta* yang rusak dll. [10].

### 2.2.3 Tipe-Tipe Beban

Perlu diketahui sifat umum dari beban dan karakteristiknya ditentukan dari faktor kebutuhan (*demand factor*), faktor beban (*load factor*), dan faktor diversitas [8].

Pada umumnya tipe-tipe beban dibagi dalam kategori sebagai berikut.

1. Rumah (perumahan) terdiri dari peralatan rumah tangga seperti lampu, kipas angin, pemanas, kulkas, AC, pemanggang, kompor listrik, pompa, dan peralatan lainnya [8].
2. Komersial, beban ini terdiri dari penerangan untuk toko atau sign lighting, kipas angin, AC, *heater*, dan peralatan listrik lainnya yang digunakan di area komersial seperti toko, restoran, dan pasar [8].
3. Industri
  - a. Industri rumah tangga 5 kW
  - b. Industri skala kecil 5-25 kW
  - c. Industri dengan skala menengah 25-100 kW
  - d. Industri besar 100-500 kW
  - e. Industri berat lebih dari 500 kW

Terdapat kedua jenis beban pada bagian terakhir membutuhkan daya pada periode yang lebih lama dalam sehari [8].
4. Kota, beban ini untuk lampu jalan dan selalu menyala sepanjang malam. Faktor beban penerangan jalan biasanya 25-30% dan beban perkotaan lainnya adalah penyediaan air minum dan irigasi [8].
5. Pertanian, di bidang pertanian, beban ini diperlukan untuk menyuplai air irigasi dengan pompa air yang digerakkan oleh motor listrik [8]

### 2.2.4 Beban Tidak Normal

Dalam rangkaian distribusi, beban-beban yang dihubungkan ke sistem tidak berubah dari beban tetap tiga-fasa yang seimbang. Karakteristik peralatan menyebabkan gelombang arus pada beban menjadi

tidak seimbang. Seperti pada perumahan, tiap-tiap rumah dihubungkan dengan satu fasa dari sistem tiga-fasa yang mengakibatkan beban tidak seimbang. Daerah industri banyak peralatan yang tidak seimbang atau bergelombang putus-putus, misalnya untuk pengelasan, pemanas dengan termostat, mesin bubut, tungku listrik, motor-motor pemutar dan sebagainya [8].

### **2.2.5 Arus Netral**

Pada Arus netral sistem distribusi tenaga listrik biasa dikenal sebagai arus yang mengalir pada kawat netral sistem distribusi tegangan rendah tiga fasa empat kawat. Arus netral tersebut akan muncul jika.

- Kondisi beban tidak seimbang.
- Adanya arus harmonisa akibat beban non-linear.

Arus mengalir pada kawat netral merupakan arus bolak-balik untuk sistem distribusi tiga fasa empat kawat yaitu penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris [12].

### **2.2.6 Distribusi Daya**

Distribusi tegangan tinggi merupakan tiga-fasa, satu fasa atau sistem kawat tunggal kembali lewat tanah. Distribusi tegangan rendah berupa fasa tunggal, tiga-fasa empat kawat atau satu fasa empat kawat dari sistem tegangan tinggi [17]. Sistem distribusi dapat dibebani sama atau tidak dan dengan cara berikut:

1. Distribusi dengan catu pada satu ujung.
2. Distribusi dengan catu pada dua ujung.
3. Distribusi lingkaran.
4. Distribusi lingkaran dengan penghubung-penghubung antara.
5. Distribusi paralel.

### **2.2.7 Sistem Distribusi Tenaga Listrik**

Salah satu bagian dari penyaluran energi listrik dari Gardu Induk dan trafo distribusi adalah jaringan distribusi primer. Penyulang lateral dan sub lateral biasanya dipergunakan pada daerah pedesaan yang

menggunakan saluran satu fasa yang terdiri dari satu penghantar fasa dan satu penghantar netral dan menggunakan Trafo satu fasa [9].

Sebuah penyulang diberikan perangkat penutup balik pada lokasi sedemikian rupa untuk mengisolasi pada saat terjadi gangguan agar tetap menjaga pelayanan kepada konsumen. Hal ini dapat dicapai dengan koordinasi sistem proteksi yang baik. Untuk meningkatkan keandalan penyaluran tenaga listrik. Dalam penyaluran tenaga listrik saat ini digunakan sistem proteksi yang canggih dan kompleks mulai dari pengendalian manual dan pengendalian dengan remot dengan pengawasan sistem komputer [9].

Pada daerah yang padat dan beban yang besar seperti di kawasan metropolitan saluran yang digunakan adalah saluran bawah tanah. Kabel bawah tanah biasanya menggunakan tiga konduktor. Saluran ini memiliki estetika yang lebih baik, tetapi apabila dilakukan pemeliharaan memerlukan waktu yang lebih lama, biaya yang dikeluarkan untuk saluran kabel bawah tanah lebih mahal dari pada saluran udara [9].

#### **2.2.8 Penyaluran Primer Tipe Radial**

Tipe radial merupakan konfigurasi jaringan primer, setiap saluran hanya dapat membawa daya dari satu aliran daya. Keuntungan dari sistem ini adalah kesederhanaannya dan pengurangan biaya produksi awal dari sudut pandang teknis. Kerentanannya adalah kontinuitas layanan tidak terjamin dan jika terjadi kegagalan (terutama di dekat sumber listrik) akan terputus hingga semua beban teratasi. Ini berarti layanan pelanggan akan terganggu dan kehilangan daya serta voltase juga akan lebih tinggi [10].

#### **2.2.9 Penyaluran Primer Tipe Loop**

Konfigurasi loop adalah jaringan yang dimulai pada titik di busbar, dikelilingi oleh beban, dan kemudian kembali ke titik busbar semula. Jaringan konfigurasi ini biasanya digunakan dalam sistem distribusi daya untuk menyediakan beban dengan kontinuitas dan layanan yang baik

(lebih baik daripada sistem radial) dan banyak digunakan di kawasan industri dan komersial kecil [10].

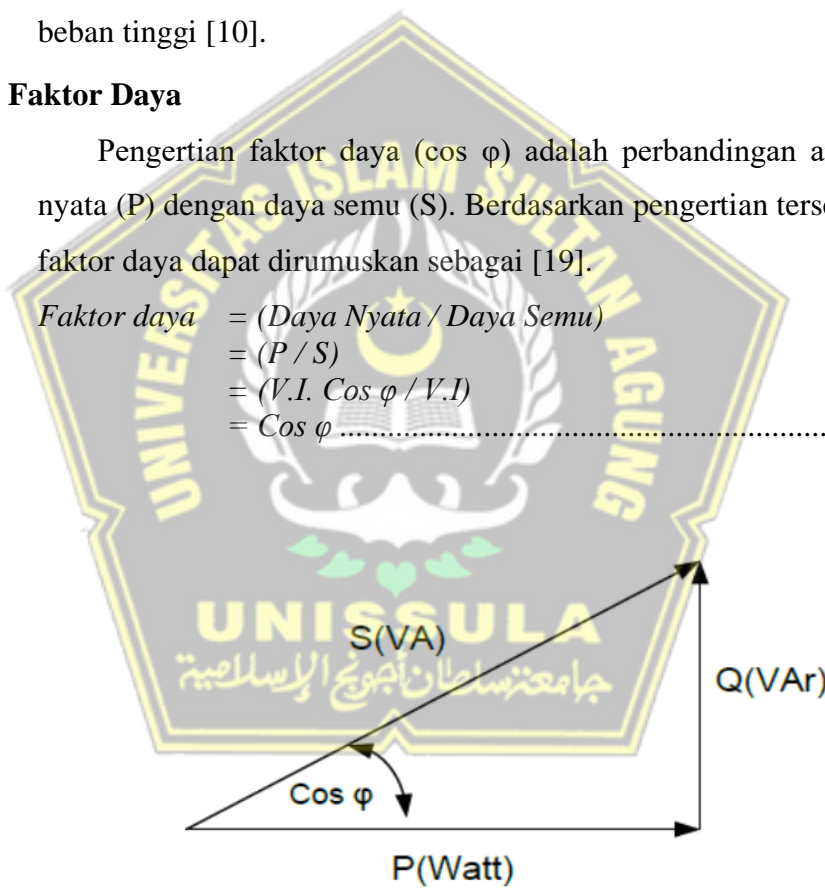
**2.2.10 Primary Network**

Primer (Jaringan) adalah sistem dengan beberapa rel daya yang terhubung ke saluran penyulang, di mana setiap gardu distribusi dapat menerima daya dari satu rel ke rel lainnya. Keuntungan dari metode grid adalah kontinuitas layanan lebih baik daripada pola radial atau loop. Fleksibilitas untuk mengantisipasi perkembangan beban untuk kepadatan beban tinggi [10].

**2.2.11 Faktor Daya**

Pengertian faktor daya ( $\cos \phi$ ) adalah perbandingan antara daya nyata (P) dengan daya semu (S). Berdasarkan pengertian tersebut, maka faktor daya dapat dirumuskan sebagai [19].

$$\begin{aligned}
 \text{Faktor daya} &= (\text{Daya Nyata} / \text{Daya Semu}) \\
 &= (P / S) \\
 &= (V.I \text{ Cos } \phi / V.I) \\
 &= \text{Cos } \phi \dots\dots\dots (2.1)
 \end{aligned}$$



Gambar 2.4 Faktor Daya

$$\begin{aligned}
 \text{Daya Semu} &= V.I (VA) \dots\dots\dots (2.2) \\
 \text{Daya Nyata} &= V.I \text{ Cos } \phi (Watt) \dots\dots\dots (2.3) \\
 \text{Daya Reaktif} &= V.I \text{ Sin } \phi (VAr) \dots\dots\dots (2.4)
 \end{aligned}$$



### 2.2.12 Faktor Daya Tertinggal

Faktor daya tertinggal (*lagging*) adalah keadaan faktor daya ketika memiliki kondisi sebagai berikut [18]:

1. Beban alat-alat listrik membutuhkan daya reaktif dari sistem.
2. Arus (I) tertinggal dari tegangan (V), dan V mendahului I dengan sudut  $\phi$ .

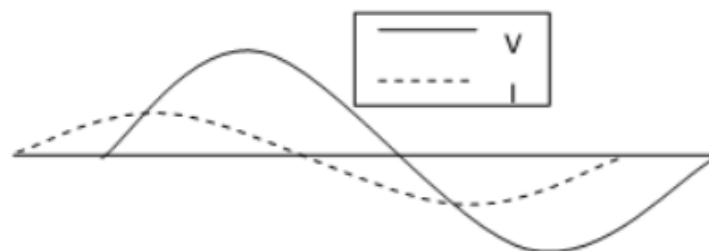


Gambar 2. 5 Arus tertinggal dari tegangan sebesar  $\phi$

### 2.2.13 Faktor Daya Mendahului

Faktor daya mendahului (*leading*) merupakan keadaan faktor daya ketika memiliki kondisi berikut [18]:

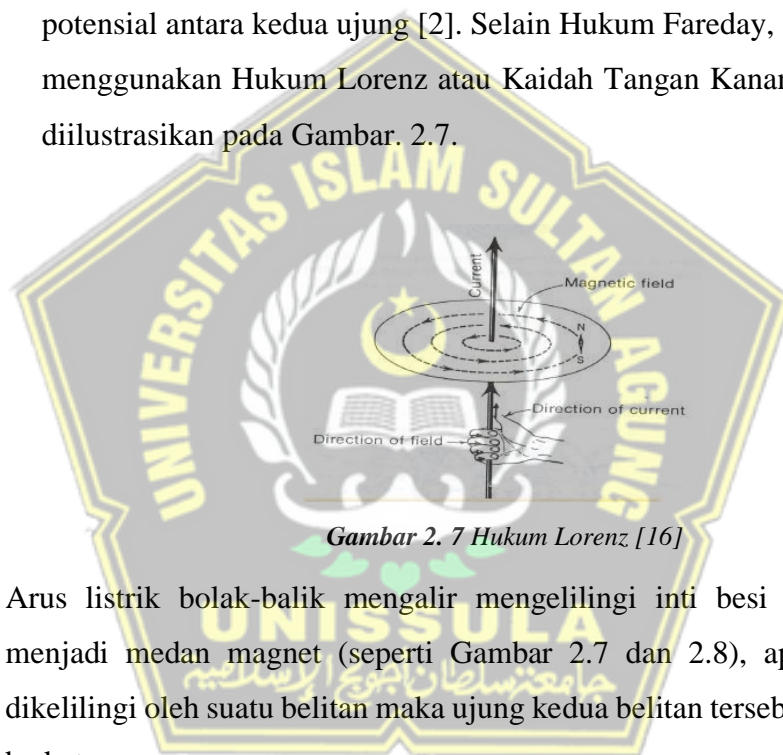
1. Beban alat-alat listrik memberikan daya reaktif dari beban bersifat kapasitif.
2. Arus mendahului tegangan dan V tertinggal dari I dengan sudut  $\phi$ .



Gambar 2. 6 Arus mendahului tegangan sebesar  $\phi$

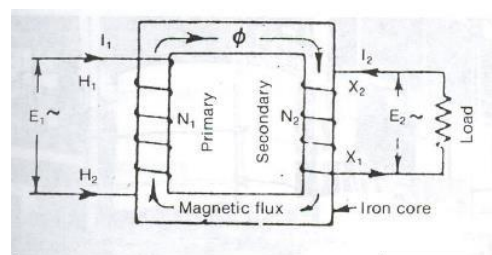
### 2.2.14 Trafo

Prinsip kerja transformator didasarkan pada hukum Ampere dan hukum Faraday, yaitu arus listrik menimbulkan medan magnet dan sebaliknya medan magnet menghasilkan arus. Jika salah satu belitan transformator menerima arus bolak-balik, jumlah garis medan magnet berubah. Jadi di sisi primer, ada induksi. Permukaan sekunder menerima garis medan magnet dari permukaan primer, kuantitasnya juga berubah. Kemudian pada sisi sekunder juga terjadi induksi sehingga terjadi beda potensial antara kedua ujung [2]. Selain Hukum Faraday, Transformator menggunakan Hukum Lorentz atau Kaidah Tangan Kanan, seperti yang diilustrasikan pada Gambar. 2.7.



*Gambar 2. 7 Hukum Lorentz [16]*

Arus listrik bolak-balik mengalir mengelilingi inti besi akan berubah menjadi medan magnet (seperti Gambar 2.7 dan 2.8), apabila magnet dikelilingi oleh suatu belitan maka ujung kedua belitan tersebut akan terjadi beda tegangan.



*Gambar 2. 8 Arus Bolak-balik Mengelilingi Inti Besi [16]*

### 2.2.15 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. Saat beroperasi minyak berkontak dengan bagian-bagian yang panas sehingga temperaturnya naik dan berkembang. Untuk membiarkan minyak mengembang dan mengalirkan udara keluar dari tangki minyak maka tangki kecil yang disebut *conservator* dipasang diluar tangki. Trafo tenaga dengan kapasitas besar mempunyai pendingin secara paksa juga dilengkapi kipas angin atau pendinginan dengan hembusan udara. Trafo distribusi banyak dipasang pada tiang-tiang dekat dengan perumahan penduduk, Trafo ini menyalurkan energi pada jaringan distribusi untuk disalurkan ke rumah penduduk [11].

### 2.2.16 Trafo Tiga Fasa

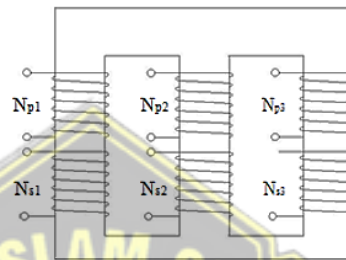
Trafo tiga fasa mempunyai prinsip sama dengan Trafo satu fasa, bedanya pada Trafo tiga-fasa mengenal hubungan bintang, segitiga dan hubungan zig-zag, dan sistem bilangan jam yang menentukan kerja paralel tiga fasa. Trafo tiga-fasa sebagai Trafo satu fasa, teknik perhitungannya sama, hanya nilai akhirnya mempunyai parameter tertentu (arus, tegangan, dan daya). Trafo tiga-fasa dikalikan dengan nilainya. Trafo tiga-fasa dikembangkan sebagai alasan ekonomis, biayanya lebih murah karena bahan yang digunakan lebih sedikit dibanding tiga buah Trafo satu fasa dan dengan jumlah daya sama dengan satu Trafo tiga fasa, dan pengerjaannya lebih cepat [5].

Trafo tiga fasa adalah Trafo yang sering dipakai hal ini dikarenakan:

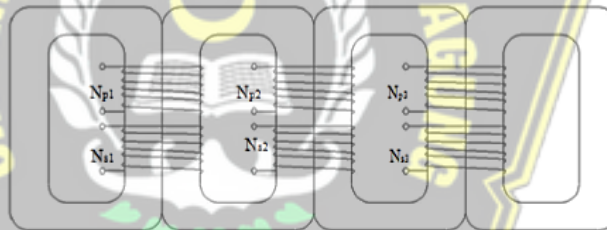
1. Daya yang sama tidak memerlukan ruang yang besar.
2. Mempunyai banyak nilai ekonomis.
3. Pemeliharaan pada barang lebih murah dan lebih mudah.

### 2.2.17 Konstruksi Trafo Tiga Fasa

Mengurangi rugi-rugi yang disebabkan oleh arus di dalam inti, rangkaian magnetik biasanya dari setumpuk laminasi tipis. Dua jenis konstruksi yang digunakan pada Trafo tiga fasa seperti Gambar 2.9 dan 2.10.



Gambar 2. 9Konstruksi Trafo Tiga-fasa Tipe Inti [11]



Gambar 2. 10 Trafo Tiga-fasa Tipe Cangkang [11]

Dalam (*core type*) kumparan dililitkan di sekitar kedua kaki inti magnetik persegi. *Shell type* kumparan dililitkan sekitar kaki tengah dari inti berkaki tiga dengan laminasi silikon-steel. Umumnya Trafo yang bekerja pada frekuensi di bawah beberapa ratus Hz. Silikon-steel memiliki sifat murah, rugi inti rendah dan permeabilitasnya tinggi dan rapat fluks tinggi. Inti Trafo yang dipergunakan kadang dibuat dari campuran tepung ferromagnetik sebagai permalloy untuk rangkaian komunikasi pada frekuensi tinggi dan tingkat energi rendah [6].

### 2.2.18 Kumparan Trafo Tiga Fasa

Trafo tiga-fasa baik kumparan primer maupun sekunder dapat berupa hubungan bintang, hubungan delta dan hubungan zigzag. Tiap kumparan fasa dalam sistem tiga-fasa terdiri dari terminal awal dan akhir kumparan, untuk kumparan fasa pemilihan dari permulaan dan akhir adalah bebas. Pada kondisi ini dianggap awal dari kumparan adalah titik yang mempunyai polaritas dan masing-masing fasa diberi notasi A, B, C untuk kumparan tegangan tinggi dan a, b, c untuk tegangan rendah [11].

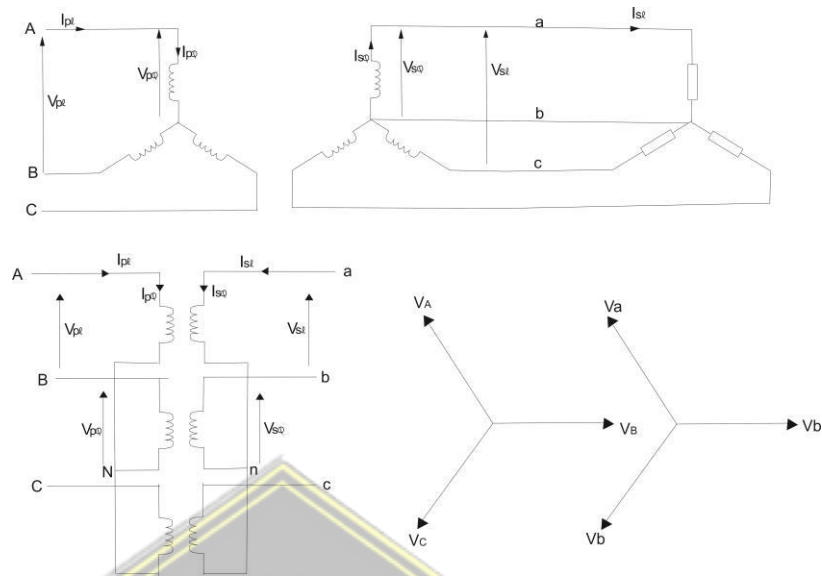
### 2.2.19 Jenis-Jenis Hubungan Trafo Tiga-Fasa

Tiga lilitan fasa pada sisi primer dan sekunder dapat dihubungkan berbagai macam hubungan, seperti bintang dan segitiga, dengan kombinasi seperti Y-Y, Y- $\Delta$ ,  $\Delta$ -Y,  $\Delta$ - $\Delta$ , kasus tertentu lilitan sekunder dapat dihubungkan zig-zag, sehingga diperoleh kombinasi  $\Delta$ -Z, dan Y-Z. Hubungan zig-zag seperti sambungan bintang istimewa, hubungan ini digunakan mengantisipasi kejadian yang terjadi apabila dihubungkan secara bintang dengan beban fasanya tidak seimbang [7]. Di bawah ini pembahasan hubungan trafo tiga fasa secara umum.

#### 1. Hubungan Kumparan Trafo Tiga-fasa Y-Y

Jika hubungan ini digunakan untuk trafo distribusi 20 kV/380 V maka power *supply* tiga fasa dengan tegangan 380 V dan juga I fasa dengan 220 V (antara fasa dan netral) tersedia sisi sekunder seperti terlihat dalam Gambar 2.11 hubungan ini tidak menyebabkan suatu pergeseran antara primer dan sekunder. Bila terminal akhir a, b, dan c dihubungkan untuk membentuk titik netral A, B dan C yang dibawa keluar maka akan terjadi pergeseran sebesar  $180^\circ$  antara tegangan sisi primer dan sekunder. Kedua sambungan memberikan kinerja yang sama, tetapi jika kedua transformator ini dihubungkan secara paralel, keduanya harus dihubungkan dengan pergeseran fasa  $-0$  atau  $180^\circ$  [11].





Gambar 2. 11 Hubungan Y-Y Dalam Sistem Tiga Kawat [11]

Hubungan Y-Y dalam sistem 3 kabel tidak diinginkan. Ini karena arus eksitasi memberikan tegangan sinusoidal pada sisi primer, tetapi itu bukan gelombang sinusoidal murni dan mengandung harmonik ketiga sebagai hasil dari arus eksitasi tiga fase. tidak menghasilkan jumlah nol dan membutuhkan kabel netral untuk mengalirkan arus yang dihasilkan. Bila netral tidak ada maka ketiga arus dipaksa untuk menjadi nol. Sebagai konsekuensinya, fluks tidak berbentuk sinus murni, selain itu bila beban tidak simetri tegangan *line to netral* menjadi tidak simetri dan akan menyebabkan isolasi mengalami gangguan [11].

Pada hubungan Y-Y, tegangan fasa dari sisi primer dinyatakan dengan [11]:

$$V_{p\phi} = V_{p\ell}\sqrt{3} \dots\dots\dots (2.5)$$

dengan:

$$V_{p\phi} = \text{tegangan primer line to line (V)}$$

$$V_{p\ell} = \text{tegangan primer line to netral (V)}$$

Pada hubungan Y-Y tegangan fasa dari sisi sekunder dinyatakan dengan [11]:

$$V_{s\phi} = V_{s\ell} / \sqrt{3} \dots\dots\dots (2.6)$$

dengan:

$V_{s\phi}$  = tegangan sekunder line to line (V)

$V_{s\ell}$  = tegangan sekunder line to netral (V)

Daya output Trafo adalah [11],

$$P_{out} = \sqrt{3} V_s I_s \cos \varphi_s \dots\dots\dots(2.7)$$

dengan:

$P_{out}$  = daya output Trafo (W)

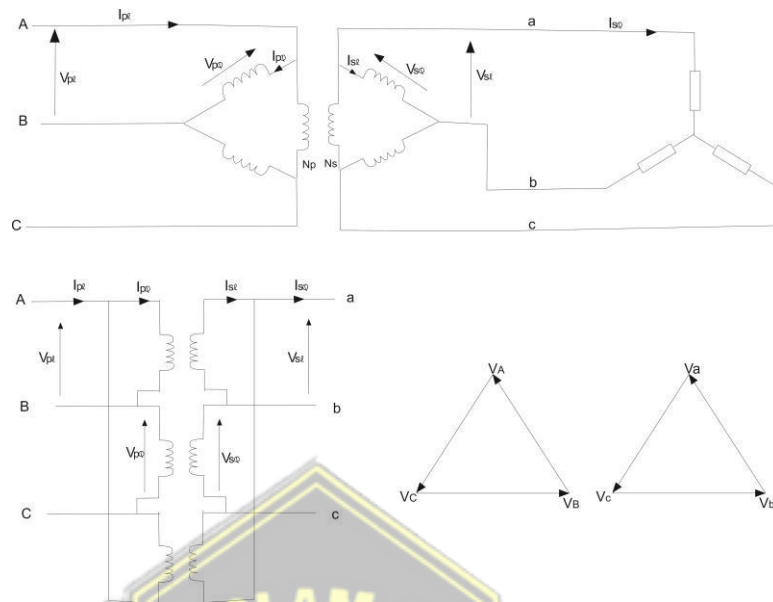
$V_s$  = tegangan sisi sekunder (V)

$I_s$  = arus sisi sekunder (A)

## 2. Hubungan Kumbaran Trafo Tiga-fasa Delta-Delta

Hubungan Kumbaran tegangan *line* sama dengan tegangan fasa setiap sisi. Arus fasa adalah arus *line* dibagi dengan  $\sqrt{3}$ . Bila dibandingkan dengan hubungan Y-Y untuk tegangan dan arus sama hubungan D-D mempunyai jumlah belitan yang lebih besar dalam tiap kumbaran fasa tetapi luas penampang konduktor lebih kecil oleh karena itu hubungan DD lebih ekonomis untuk Trafo yang besar karena rating tegangan yang lebih rendah, hubungan delta yang tertutup membantu meredam harmonisa ketiga. Titik netral tidak ada dalam hubungan ini oleh karena itu diperlukan titik netral fiktif dengan menghubungkan tiga tahanan atau induktansi atau kapasitansi yang sama dalam Y pada terminal-terminal a, b dan c [11].

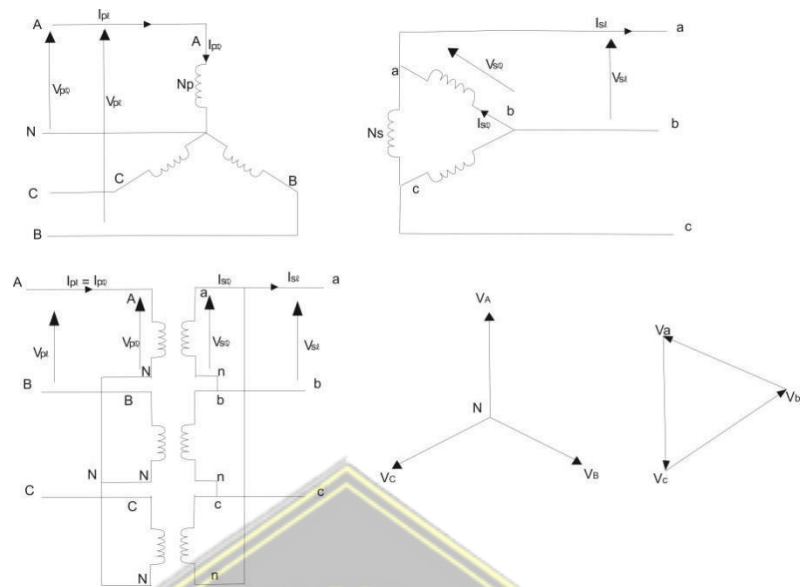
Trafo D-D mempunyai keuntungan bahwa salah satu Trafo dapat diputus untuk perbaikan dan sisa dari dua kumbaran yang lain masih tetap bekerja untuk memberikan daya dengan rating yang lebih kecil. Ini dikenal sebagai open delta atau hubungan Y-Y. Hubungan ini menyebabkan pergeseran fasa nol antara tegangan sisi primer dan sekunder dibalik, diperoleh pergeseran fasa sebesar  $180^\circ$ . Bila Trafo D-D dioperasikan secara paralel maka harus dihubungkan untuk pergeseran fasa yang sama besar [11].



Gambar 2. 12 Hubungan D-D [11]

### 3. Hubungan Y-D

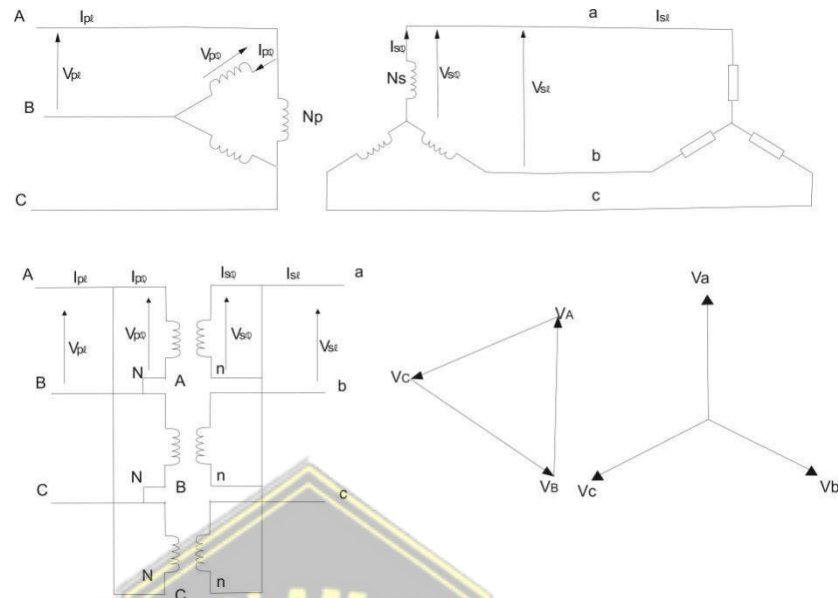
Netral tegangan tinggi dapat dihubungkan ke bumi dan tegangan jaringan primer  $\sqrt{3}$  kali tegangan fasa, tetapi arus fasanya sama. Koneksi ini tidak memiliki konten harmonik ketiga. Ini karena koil delta membuat sambungan ini lebih stabil untuk beban yang tidak seimbang. Ini karena rangkaian delta sebagian terdistribusi tergantung pada ketidakseimbangan yang terjadi. Namun, koneksi ini memperkenalkan pergeseran fasa antara tegangan primer dan sekunder. Ini harus diperhitungkan saat menghubungkan dua transformator secara paralel [11].



Gambar 2. 13 Hubungan Y-D [11]

#### 4. Hubungan D-Y

Pada primer tegangan line dan fasa adalah sama, sedangkan arus *line* sama dengan  $\sqrt{3}$  kali arus fasa. Sedangkan pada sisi sekunder tegangan *line* adalah  $\sqrt{3}$  kali tegangan fasa dan arus line sama dengan arus fasa, seperti pada hubungan Y-D adanya hubungan D membantu menstabilkan tegangan pada titik netral. Pergeseran fasa sebesar  $30^\circ$  pada tegangan sisi primer dan sekunder [11]. Hubungan D-Y banyak dipakai untuk sisi kirim dan sisi penerima dari sistem daya. Generator dari pembangkit memberikan energi kumparan D dan kumparan Y dihubungkan jaringan transmisi dan tegangan tinggi. Dalam Trafo distribusi, penyulang dihubungkan pada kumparan D dan kumparan Y memberikan energi pada distribusi empat kawat tiga-fasa [11].



Gambar 2. 14 Hubungan D-Y [11]

### 2.2.20 Vektor Grup

Untuk memfasilitasi hubungan paralel trafo tiga-fasa, diklasifikasikan dalam beberapa simbol, yang disebut Vektor Grup. Vektor Grup diberi notasi seperti  $Yy0$ ,  $Yd1$ ,  $Dy11$  dsb., dimana simbol yang pertama menyatakan hubungan kumparan tegangan tinggi (TT), yang kedua menyatakan hubungan kumparan tegangan rendah (TR) dan yang ketiga menyatakan perbedaan fasa pada vektor grup fasa dari kumparan tegangan tinggi dan tegangan rendah [11]. Misalkan trafo dengan simbol  $Yd1$  mempunyai arti:

Y = rangkaian tegangan tinggi adalah bintang

D = rangkaian tegangan rendah adalah delta

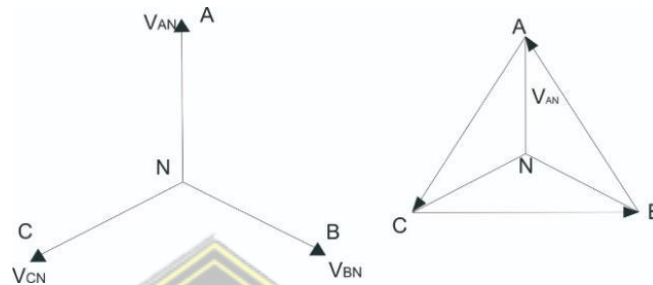
1 = perbedaan fasa antara Vektor Grup primer dan sekunder menyatakan jam 1.

#### 1. Pergeseran Fasa dari Grup Fasa (*Phase Grup*) dari Trafo Tiga-Fasa

Perbedaan fasa antara vektor grup TT dan TR disebut beda fasa vektor grup. Vektor grup dari kumparan primer (TT) dinyatakan oleh  $V_{AN}$ , dimana  $V_{AN}$  menyatakan tegangan antara fasa A dan titik



netral. Untuk sistem bintang titik netral N adalah pusat dari bintang, dan untuk sistem delta titik netral N adalah titik berat dari segitiga yang disusun oleh fasor-fasor tegangan fasa A, B dan C seperti terlihat pada Gambar 2.15 [11].



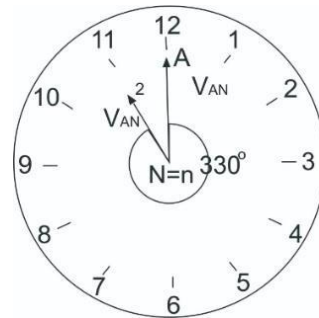
**Gambar 2. 15** Vektor Grup Sisi Primer Y dan D [11]

Untuk kumparan sekunder, vektor grup dinyatakan oleh  $V_{an}$ , dimana  $V_{an}$  adalah tegangan fasa a dari kumparan sekunder dan titik n, seperti terlihat pada Gambar 2.16 Titik netral n mempunyai pengertian yang sama dengan kumparan primer [11].



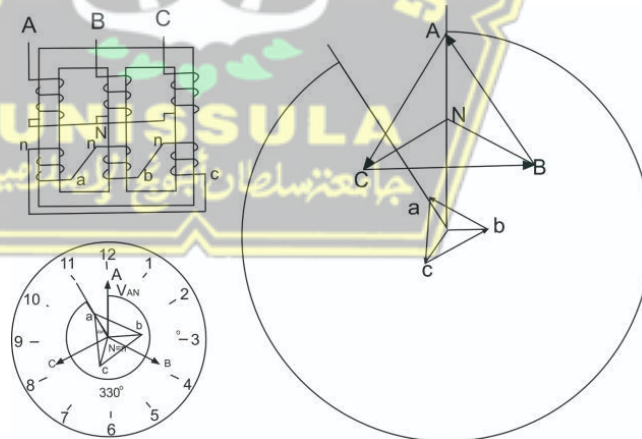
**Gambar 2. 16** Vektor Grup Sisi Sekunder Y dan D [11]

Perbedaan fasa atau pergeseran fasa antara vektor grup primer dan sekunder dinyatakan sebagai sudut  $\alpha$ , yang dinyatakan dalam derajat. Bila sudut  $\alpha$  dibagi dengan 30, maka dihasilkan suatu bilangan bulat, yang menyatakan waktu dalam jam, yang ditunjukkan oleh suatu jam (penunjuk waktu). Misalkan bila perbedaan fasa adalah 330 dengan 30 diperoleh angka 11. Angka 11 ini bisa dibaca dalam suatu jam dengan vektor  $V_{AN}$  bertindak sebagai jarum penunjuk menit suatu jam dengan vektor  $V_{an}$  merupakan jarum penunjuk jam, seperti pada Gambar 2.17 [11].



**Gambar 2. 17** Jam Untuk Perbedaan Sudut Vektor Grup [11]

Dengan memahami perbedaan fasa antara vektor grup primer dan sekunder, maka suatu trafo tiga-fasa dapat digambarkan dengan suatu simbol, asalkan diketahui hubungan dari kumparan-kumparan primer dan sekunder dan perbedaan fasa  $\alpha$ . Misalkan kita mempunyai suatu trafo tiga-fasa dalam Y-D, perbedaan fasa grup sebesar jam 11, seperti terlihat dalam Gambar 2.17 [11]. Untuk mengetahui bagaimana bentuk konfigurasi trafo seperti itu, maka kita gambarkan dahulu diagram trafo dalam hubungan Y-D seperti Gambar 2.18 [11].



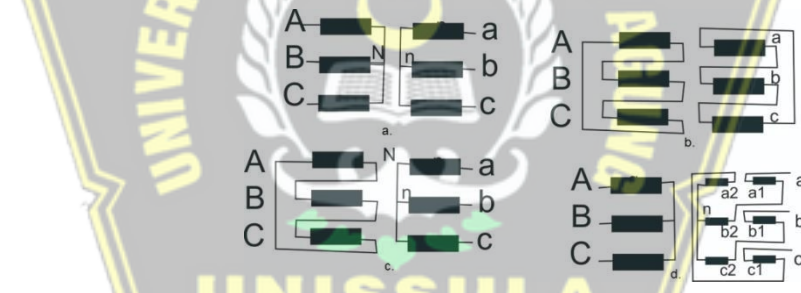
**Gambar 2. 18** Konfigurasi Trafo Tiga-fasa Hubung YD [11]

Kemudian dilakukan analisa untuk menentukan bagaimana posisi jam atau besar pergeseran fasa antar fasa grup sisi primer dan sisi sekunder. Selanjutnya dilakukan analisa sebagai berikut [11]:

- a. Dalam kumparan sekunder titik c dihubungkan dengan titik na, sehingga  $V_{an} = V_{ac}$  dan sefasa dengan  $V_{AN}$ . Jadi  $V_{ac} // V_{AN}$ .
- b. Titik a dihubungkan dengan titik nb, sehingga  $V_{bn} = V_{ba}$  dan sefasa dengan  $V_{BN}$ . Jadi  $V_{ba} // V_{BN}$ .
- c. Titik b dihubungkan dengan titik nc, sehingga  $V_{cn} = V_{cb}$ , dan sefasa dengan  $V_{CN}$ . Jadi  $V_{cb} // V_{CN}$ .

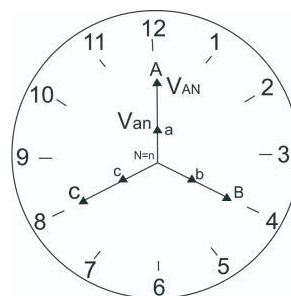
**2. Trafo Tiga-Fasa Hubungan YY**

Titik netral N dari masing-masing kumparan primer dihubungkan menjadi satu, dan titik n dari masing-masing sisi sekunder dihubungkan menjadi satu. Karena itu  $V_{AN}$  sefase dengan  $V_{an}$  sehingga vektor  $V_{AN}$  dan  $V_{an}$  berhimpit.  $V_{BN}$  sefase dengan  $V_{bn}$ , sehingga vektor  $V_{BN}$  dan  $V_{bn}$  berhimpit.  $V_{CN}$  sefase dengan  $V_{cn}$ , sehingga vektor  $V_{CN}$  dan  $V_{cn}$  berhimpit [11].



**Gambar 2. 19** Trafo Tiga-fasa Hubung; a. YY b. DD c. DY d. YZ [11]

Gambar 2.20 terlihat bahwa beda fasa antara vektor grup sisi primer dan sisi sekunder adalah 0. Karena itu simbol untuk Trafo tersebut adalah  $Yy0$  atau  $Y-y12$  [11].



**Gambar 2. 20** Vektor Grup Trafo Tiga-fasa Hubung YY [11]

### 3. Trafo Tiga-Fasa Hubung DD

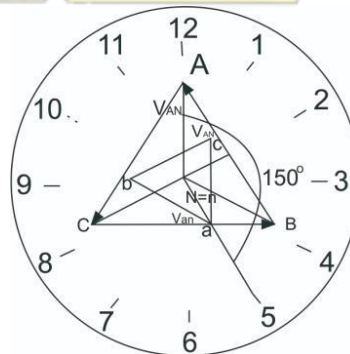
Terlihat bahwa  $V_{AB}$  dan  $V_{ac}$  berbeda fasa 180 sehingga  $AB \parallel ca$ ,  $V_{BC}$  dan  $V_{ab}$  berbeda fasa 180 sehingga  $BC \parallel ba$ ,  $V_{CA}$  dan  $V_{bc}$  berbeda fasa 180 sehingga  $AC \parallel cb$ . Karena itu, vektor  $V_{AN}$  dan  $V_{an}$  berbeda fasa juga dengan sudut 300. Jadi simbol dari rangkaian Trafo Dd10 [11].



Gambar 2. 21 Vektor Grup Trafo Tiga-fasa Hubung DD [11]

### 4. Trafo Tiga-Fasa Hubung DY

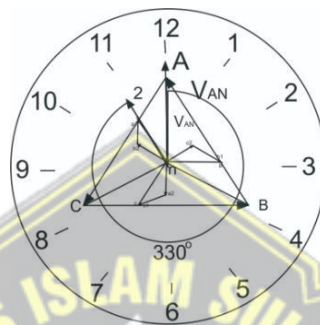
Terlihat bahwa,  $V_{AN}$  sefase dengan  $V_{an}$  sehingga  $AB \parallel an$ ,  $V_{BC}$  sefase dengan  $V_{bn}$  sehingga  $BC \parallel bn$ ,  $V_{CA}$  sefase dengan  $V_{cn}$  sehingga  $CA \parallel cn$ . Karena itu  $V_{AN}$  dan  $V_{an}$  berbeda fasa juga dengan sudut 150. Jadi simbol dari rangkaian Trafo Yd5 [11].



Gambar 2. 22 Vektor Grup Trafo Tiga-fasa Hubung DY [11]

**5. Trafo Tiga-Fasa Hubung YZ**

Berdasarkan Gambar 2.23 terlihat bahwa VAN, Va1 dan Va2 adalah sefasa, sehingga AN // a1b1 // a2n, VBN, Vb1 dan Vb2 adalah sefasa, sehingga BN // b1c1 // b2n, VCN, Vc1 dan Vc2 adalah sefasa, sehingga CN // c1b1 // c2n [11].



Gambar 2. 23 Vektor Grup Trafo Tiga-fasa Hubung YZ [11]

Terlihat bahwa beda fasa antar vektor grup sisi primer dan sekunder adalah 330. Karena itu simbol untuk Trafo tersebut adalah Yz11[11].

**2.2.21 Perhitungan Arus Beban Penuh Trafo**

Daya Trafo bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan sebagai berikut [10]:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots\dots\dots (2.8)$$

dengan :

S = daya Trafo (kVA)

V = tegangan sisi primer Trafo (kV)

I = arus jala-jala (A)

Dari rumus di atas, maka untuk menghitung beban penuh (*full load*) digunakan rumus [10]:

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \dots\dots\dots (2.9)$$

dengan:

$I_{FL}$  = arus beban penuh (A)

S = daya Trafo (kVA)

V = tegangan sisi sekunder Trafo (kV)



Untuk presentase pembebanan pada Trafo dapat menggunakan rumus:

$$\%IUR = \frac{\max \left[ I_a - \frac{I_a+I_b+I_c}{3}, I_b - \frac{I_a+I_b+I_c}{3}, I_c - \frac{I_a+I_b+I_c}{3} \right]}{\frac{I_a+I_b+I_c}{3}} \times 100\% . \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

dengan:

$I_a$  = arus fasa R

$I_b$  = arus fasa S

$I_c$  = arus fasa T

### 2.2.22 Ketidakseimbangan Tegangan

Ketidakseimbangan tegangan biasanya disebabkan beban antar fasa dalam keadaan tidak seimbang. Baik perbedaan beban antar fasa atau sifat beban dalam suatu proses produksi yang membebani tiap fasa pada waktu yang berbeda. Langkah untuk mengurangi pengaruh (mitigasi) ketidakseimbangan tegangan dilakukan diantaranya sebagai berikut [14]:

- a. Penyeimbangan beban pada instalasi pelanggan.
- b. Pindahan sambungan instalasi pelanggan ke instalasi dengan level hubung singkat yang lebih tinggi.
- c. Pemasangan peralatan kompresor (misal voltage compensator).

### 2.2.23 Software E-TAP

*Software E-TAP* atau biasa disebut *Power Station* merupakan perangkat lunak untuk mensimulasikan dan menyelesaikan permasalahan berhubungan dengan sistem tenaga listrik yang dapat memberikan sebuah informasi kejadian dilapangan pada metode simulasi.



*Gambar 2. 24 Icon E-TAP [15]*

E-TAP (Electric Transient and Analysis Program) adalah perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga. Perangkat dapat mensimulasikan daya offline, manajemen data real-time online, dan mengontrol sistem secara real time. Ini memiliki berbagai fungsi seperti pembangkit listrik, sistem transmisi, dan fungsi analisis sistem distribusi. Dibuat dan dikembangkan untuk meningkatkan kualitas keselamatan fasilitas nuklir A.S., E-TAP dirancang sebagai sistem pemantauan manajemen energi real-time, simulasi, kontrol, dan optimalisasi sistem tenaga [15]. E-TAP menyajikan proyek sistem tenaga dalam bentuk diagram satu garis dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai analisis, termasuk aliran daya, hubung singkat, engkol motor, stabilitas transien, koordinasi relai proteksi, dan harmonisasi sistem. [15]. E-TAP untuk manipulasi langsung tampilan gambar diagram satu baris. Program ini dirancang dengan tiga konsep utama:

1. *Virtual Reality Operasi*

Sistem program produksi sangat mirip dengan sistem operasi dalam situasi dunia nyata. Misalnya, membuka dan menutup pemutus sirkuit, menempatkan elemen dalam sistem, mengubah status pengoperasian motor, dan status elemen dan sub-elemen sistem diberi warna abu-abu pada diagram. [15].

2. *Total Integration Data*

Sistem program produksi sangat mirip dengan sistem operasi dalam situasi dunia nyata. Misalnya, membuka dan menutup pemutus sirkuit, menempatkan elemen dalam sistem, mengubah status pengoperasian motor, dan status elemen dan sub-elemen sistem diberi warna abu-abu pada diagram. [15].

3. *Simplicity in Data Entry*

Pembangkit Listrik pada E-TAP memiliki data rinci pada setiap elemen, mirip dengan data yang dijelaskan. Editor data dapat mempercepat

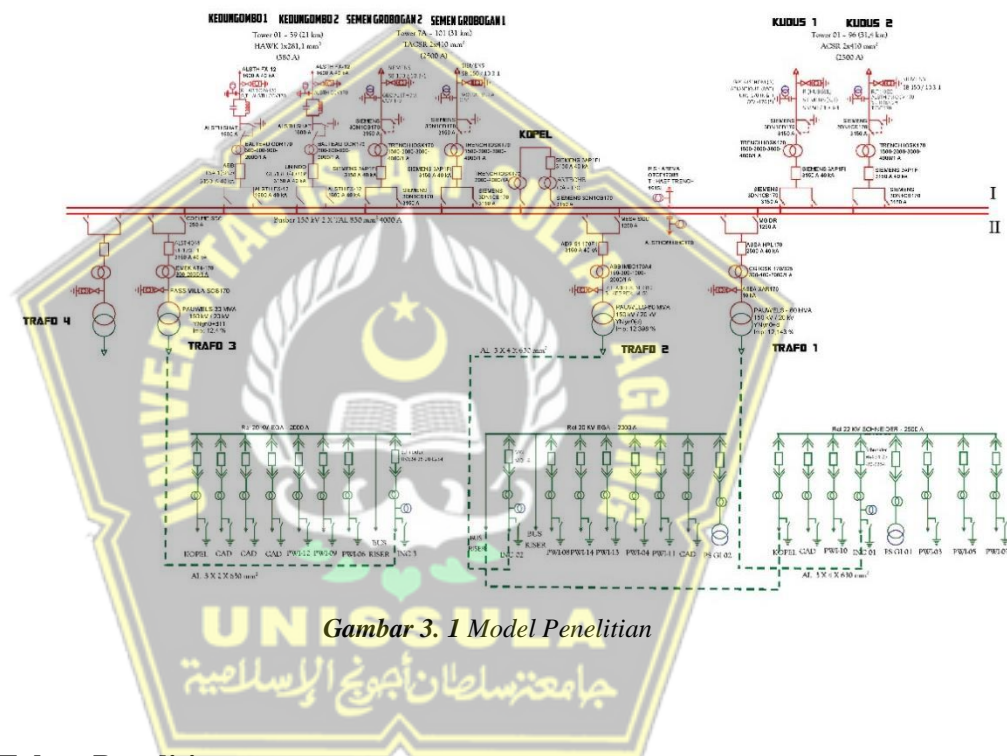
proses entri data. Data dalam program dimasukkan sesuai dengan data di bidang analisis atau desain [15].



## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Model Penelitian

Penelitian ini menggunakan model penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1 yang nantinya akan digunakan pada simulasi E-TAP 12.6.0 untuk mengetahui ketidakseimbangan beban pada Trafo 30 MVA 150/20 kV.



### 3.2 Tahap Penelitian

Dalam tahapan penelitian pada pembuatan tugas akhir ini maka penulis menggunakan metode sebagai berikut:

#### 3.2.1 Studi Pustaka

Dalam metode ini, penyusun mencari literatur, artikel, maupun sumber lainnya untuk memperoleh data dan informasi yang berkaitan dengan ketidakseimbangan beban Trafo.

### 3.2.2 Metode Wawancara

Pada metode wawancara ini penulis melakukan konsultasi langsung kepada staf PT.PLN (Persero) Distribusi Jawa Tengah dan DIY UP3 Demak ULP Purwodadi yang menangani pembebanan sistem distribusi dan Gardu Induk Purwodadi yang menangani Trafo 150/20 kV. Tujuan dari metode wawancara ini yaitu untuk memperoleh data dan informasi tentang data beban Trafo distribusi pada masing-masing penyulang, beban yang dimaksud adalah beban masing-masing fasa R, S, T dan data teknis Trafo III 30 MVA Gardu Induk Purwodadi.

### 3.2.3 Metode Observasi

Dengan metode observasi maka pengambilan data (pengamatan langsung) dilakukan dengan cara mengambil data-data teknis secara langsung ke kantor Ruangan Operasi Pengatur Distribusi (OPDIST) pada PT.PLN (Persero) Distribusi Jawa Tengah dan DIY UP3 Demak untuk data beban masing-masing fasa Trafo R, S dan T, arus netral Trafo dan single line diagram penyulang pada Gardu Induk Purwodadi dan ruang operator GI Purwodadi untuk mendapatkan data teknis Trafo III.

### 3.2.4 Simulasi Penelitian

Pada tahap simulasi penelitian ini penulis menekankan bahwa bagaimana caranya untuk menyeimbangkan beban tiap fasa pada penyulang Trafo 3 Gardu Induk Purwodadi agar meminimalkan adanya aliran arus netral yang mengakibatkan rugi-rugi daya. Data yang telah diperoleh penulis di PT.PLN (Persero) Distribusi Jawa Tengah dan DIY UP3 Demak khususnya pada penyulang Trafo 3 Gardu Induk Purwodadi berupa data-data beban tiap fasa R, S dan T, yang diperoleh dari pengukuran lapangan Trafo disimulasikan dengan *software* E-TAP 12.6.0 untuk mengetahui beban keseluruhan dan besar nilai arus netral akibat ketidakseimbangan beban, pemodelan simulasi untuk analisis arus beban berdasarkan single line diagram jaringan dan Trafo distribusi terpasang. Setelah dilakukan analisis simulasi dengan *E-TAP*



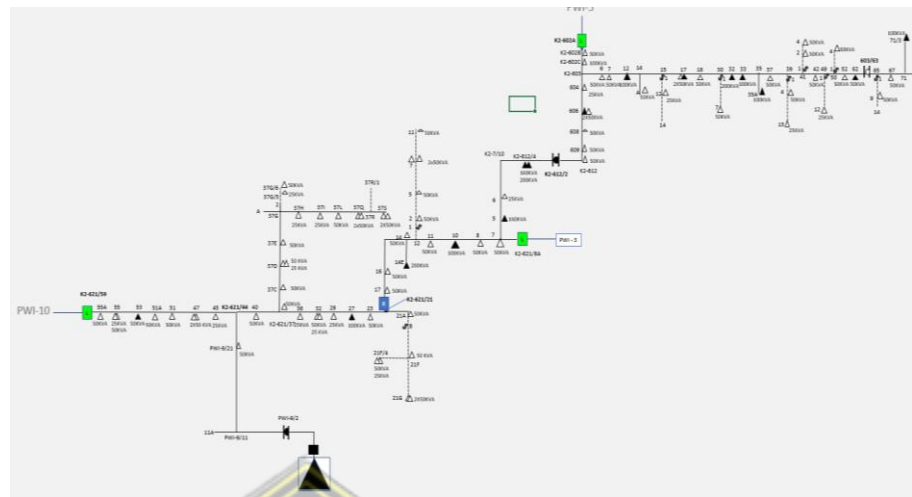
12.6.0 dihitung besar kerugian arus netral dan persentase ketidakseimbangan beban.

Analisa simulasi E-TAP bertujuan untuk mengetahui beban tiap fasa pada Trafo daya seimbang atau tidak dan mengetahui nilai arus netralnya. Setelah itu dapat dihitung persentase ketidakseimbangan beban masih dalam standar atau tidak dan besar rugi-ruginya. Arus netral muncul akibat pembebanan yang tidak seimbang untuk mengatasi hal tersebut maka perlu dilakukan penyeimbangan pembebanan Antara fasa R, S dan T untuk meminimalkan aliran arus netral. Dengan menggunakan E-TAP 12.6.0 penyeimbangan beban dilakukan dengan pemindahan Trafo 1 fasa yang merupakan beban tiap fasa, hubungan fasa Trafo dipindahkan pada fasa lain yang masih memiliki beban kecil untuk mengurangi beban fasa yang sebelumnya.

### 3.2.5 Data

Data yang diperoleh dari PT.PLN (Persero) Distribusi Jawa Tengah dan DIY UP3 Demak dan Gardu Induk Purwodadi merupakan *existing* yang sudah ada pada PT.PLN (persero) antar lain sebagai berikut :

- a. Single Line Diagram Penyulang PWI09  
Single line diagram berikut ini yang nantinya akan dimasukkan pada pemodelan simulasi E-TAP 12.6.0 untuk mengetahui beban pada Trafo.



*Gambar 3. 2 Single Line Diagram Penyulang PWI09*

b. Data Trafo Pada Penyulang PWI 09

Data dibawah untuk mengetahui kapasitas Trafo, beban Trafo dan Trafo tersebut termasuk Trafo 1 fasa atau 3 fasa.

*Tabel 3. 1 Data Pembebanan Trafo Distribusi PWI09*

NO	NOMOR TIANG	KAPASITAS TRAFU (KVA)	PHASA	URUTAN PHASA	BEBAN RIL (KVA)
1	K2-602B	50	1	T	41.71
2	K2-603/14A	50	1	T	30.08
3	K2-603/15/12	25	1	R	10.51
4	K2-603/17	50	1	S	32.96
5	K2-603/18	50	1	R	23.85
6	K2-603/30/7	50	1	R	19.18
7	K2-603/37	25	1	R	19.66
8	K2-603/39/13	25	1	S	24.62
9	K2-603/39/4	50	1	S	41.47
10	K2-603/41/4	50	1	T	22.55
11	K2-603/42	50	1	R	38.32
12	K2-603/49/12	50	1	R	18.97
13	K2-603/50/4	50	1	S	27.12
14	K2-603/52	50	1	S	23.27
15	K2-603/6	50	1	T	7.52
16	K2-603/65/9	50	1	T	25.33
17	K2-603/67	50	1	S	4.56

<b>NO</b>	<b>NOMOR TIANG</b>	<b>KAPASITAS TRAFO (KVA)</b>	<b>PHASA</b>	<b>URUTAN PHASA</b>	<b>BEBAN RIIL (KVA)</b>
18	K2-603/7	50	1	T	42.50
19	K2-604	25	1	S	18.94
20	K2-606	50	1	T	36.69
21	K2-608	50	1	R	33.13
22	K2-609	50	1	R	25.39
23	K2-621/11	50	1	T	31.91
24	K2-621/12/11	25	1	T	16.69
25	K2-621/12/2	50	1	T	36.37
26	K2-621/12/5	25	1	T	21.10
27	K2-621/12/7	50	1	T	36.18
28	K2-621/12/7.	50	1	T	16.94
29	K2-621/14	50	1	S	30.08
30	K2-621/16	50	1	T	55.88
31	K2-621/17	50	1	R	27.52
32	K2-621/21A	25	1	S	19.06
33	K2-621/21F	50	1	S	12.15
34	K2-621/21F/4	50	1	S	26.32
35	K2-621/21G	50	1	S	26.30
36	K2-621/21G	50	1	S	19.93
37	K2-621/23	50	1	S	38.02
38	K2-621/29	50	1	S	50.16
39	K2-621/32	50	1	R	19.60
40	K2-621/37	50	1	S	28.84
41	K2-621/37C	25	1	T	19.06
42	K2-621/37D	50	1	S	16.94
43	K2-621/37E	50	1	T	30.08
44	K2-621/37G/5	25	1	S	17.40
45	K2-621/37G/6	50	1	S	35.36
46	K2-621/37H	25	1	T	10.60
47	K2-621/37I	25	1	S	18.50
48	K2-621/37L	50	1	R	32.39
49	K2-621/37Q	50	1	R	27.13
50	K2-621/37Q.	50	1	S	33.31
51	K2-621/37S	50	1	R	27.80
52	K2-621/37S.	50	1	T	38.56
53	K2-621/40	50	1	R	53.15
54	K2-621/45	25	1	R	19.98
55	K2-621/47	25	1	S	44.38

NO	NOMOR TIANG	KAPASITAS TRAFO (KVA)	PHASA	URUTAN PHASA	BEBAN RIL (KVA)
56	K2-621/51	50	1	S	36.59
57	K2-621/51A	50	1	T	29.28
58	K2-621/55	25	1	R	25.81
59	K2-621/55.	50	1	T	37.41
60	K2-621/55A	50	1	T	21.57
61	K2-621/7	25	1	T	16.62
62	K2-621/7/6	25	1	T	12.38
63	K2-621/8	50	1	S	25.31
64	PWI9-20	50	1	T	11.59
65	K2-603/17	50	3		32.74
66	K2-603/32	100	3		12.91
67	K2-603/35A	50	3		48.73
68	K2-603/62	250	3		175.75
69	K2-603/72/3	100	3		29.36
70	K2-607	50	3		32.70
71	K2-621/10-3	100	3		29.73
72	K2-621/27	100	3		45.87
73	K2-621/37G	250	3		185.90
74	K2-621/53	50	3		11.77
75	K2-7/5A	160	3		121.91

c. Data Beban Harian

Berikut ini data beban harian bulan Februari 2022 pada Trafo 3 GI Purwodadi saat beban puncak pada pukul 10.00 WIB.

*Tabel 3. 2 Data Beban Harian Pukul 10.00*

TGL	R (A)	S (A)	T (A)
1	317	306	293
2	306	298	286
3	349	337	328
4	359	354	339
5	361	352	342
6	366	355	348
7	375	368	358
8	348	345	332

TGL	R (A)	S (A)	T (A)
9	323	315	306
10	370	358	348
11	299	262	274
12	459	492	469
13	369	386	347
14	332	330	314
15	326	338	322
16	323	315	306
17	311	345	328
18	348	341	330
19	337	335	314
20	232	237	231
21	327	323	311
22	356	349	338
23	329	316	307
24	346	346	329
25	291	300	271
26	278	282	259
27	280	288	262
28	262	276	250
29	281	302	298
30	231	251	248
31	273	294	288

### 3.3 Model E-TAP 12.6.0

Pada laporan ini penulis menggunakan simulasi E-TAP 12.6.0 dikarenakan perhitungan menggunakan E-TAP 12.6.0 nilainya mendekati real dan lebih sederhana. Pada analisis ketidakseimbangan beban ini perhitungan nilai arus netral menggunakan *software* etap dengan mensimulasikan jaringan distribusi penyulang PWI09, *software* E-TAP 12.6.0 dapat menganalisis analisis ketidakseimbangan beban dilakukan dengan *tool unbalanced load*, *tool unbalanced load* merupakan tool pada E-TAP 12.6.0 yang khusus dipergunakan untuk menganalisa aliran daya beban tidak seimbang, sehingga permasalahan ketidakseimbangan beban dapat diselesaikan.

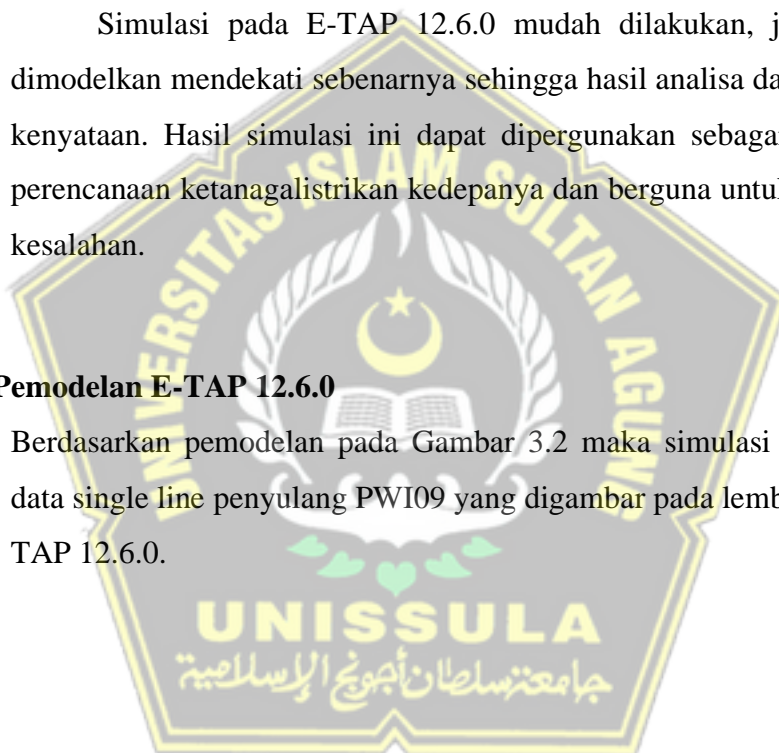


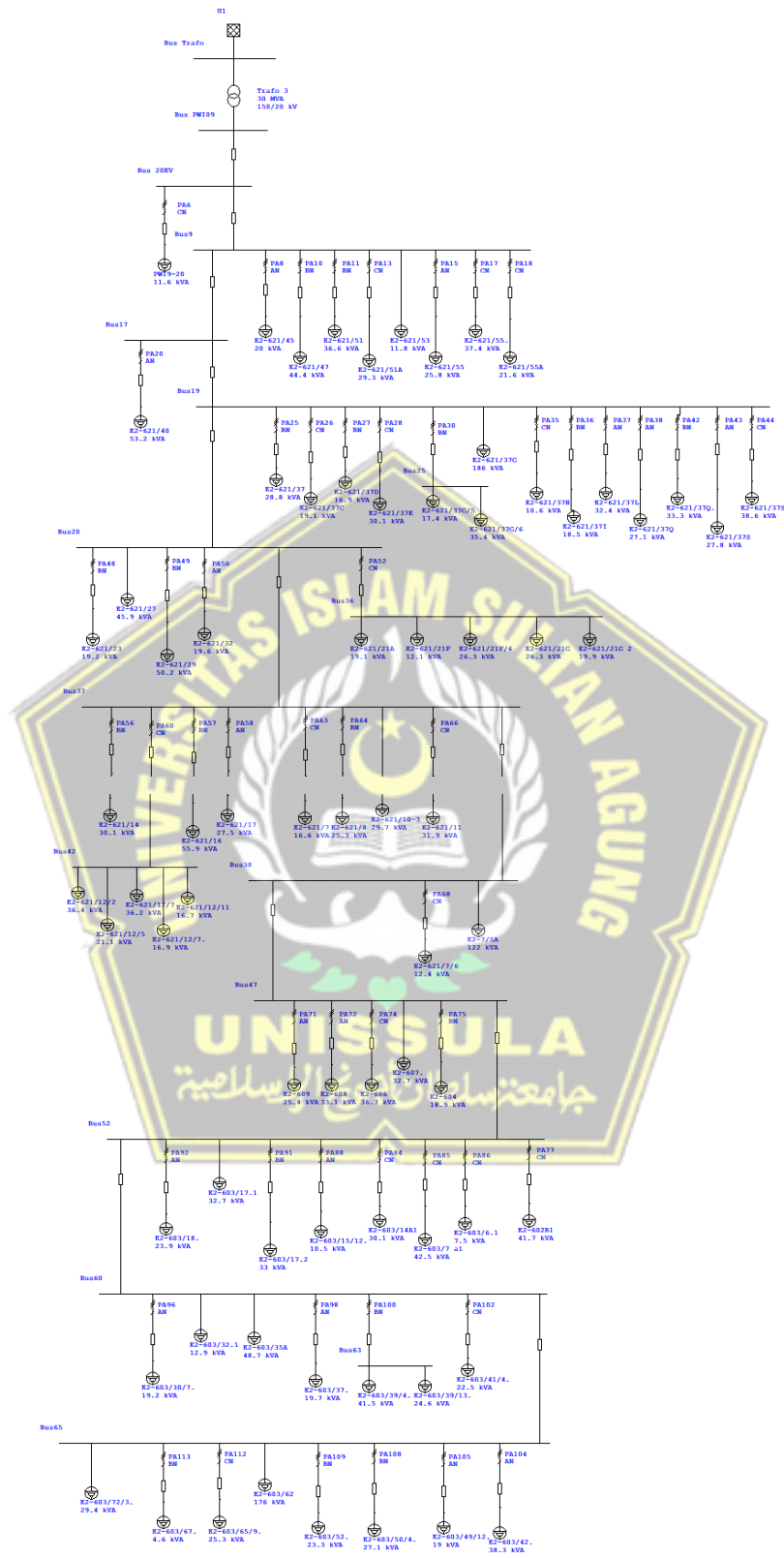
Analisis arus netral secara perhitungan matematis sulit dilakukan dikarenakan parameter analisis yang kurang lengkap, *software* E-TAP 12.6.0 dapat melakukan analisa dengan mengasumsikan parameter yang tidak ada, sehingga simulasi dapat didapatkan hasil mendekati sebenarnya. Penggunaan *software* E-TAP 12.6.0 sangat bermanfaat untuk memecahkan permasalahan sistem tenaga listrik, tool yang sudah disediakan pada *software* ETAP 12.6.0 disesuaikan dengan kebutuhan untuk analisis ketenagalistrikan.

Simulasi pada E-TAP 12.6.0 mudah dilakukan, jaringan dapat dimodelkan mendekati sebenarnya sehingga hasil analisa dapat mendekati kenyataan. Hasil simulasi ini dapat dipergunakan sebagai acuan untuk perencanaan ketenagalistrikan kedepannya dan berguna untuk meminimalisir kesalahan.

#### **3.4 Pemodelan E-TAP 12.6.0**

Berdasarkan pemodelan pada Gambar 3.2 maka simulasi menggunakan data single line penyulang PWI09 yang digambar pada lembar simulasi E-TAP 12.6.0.



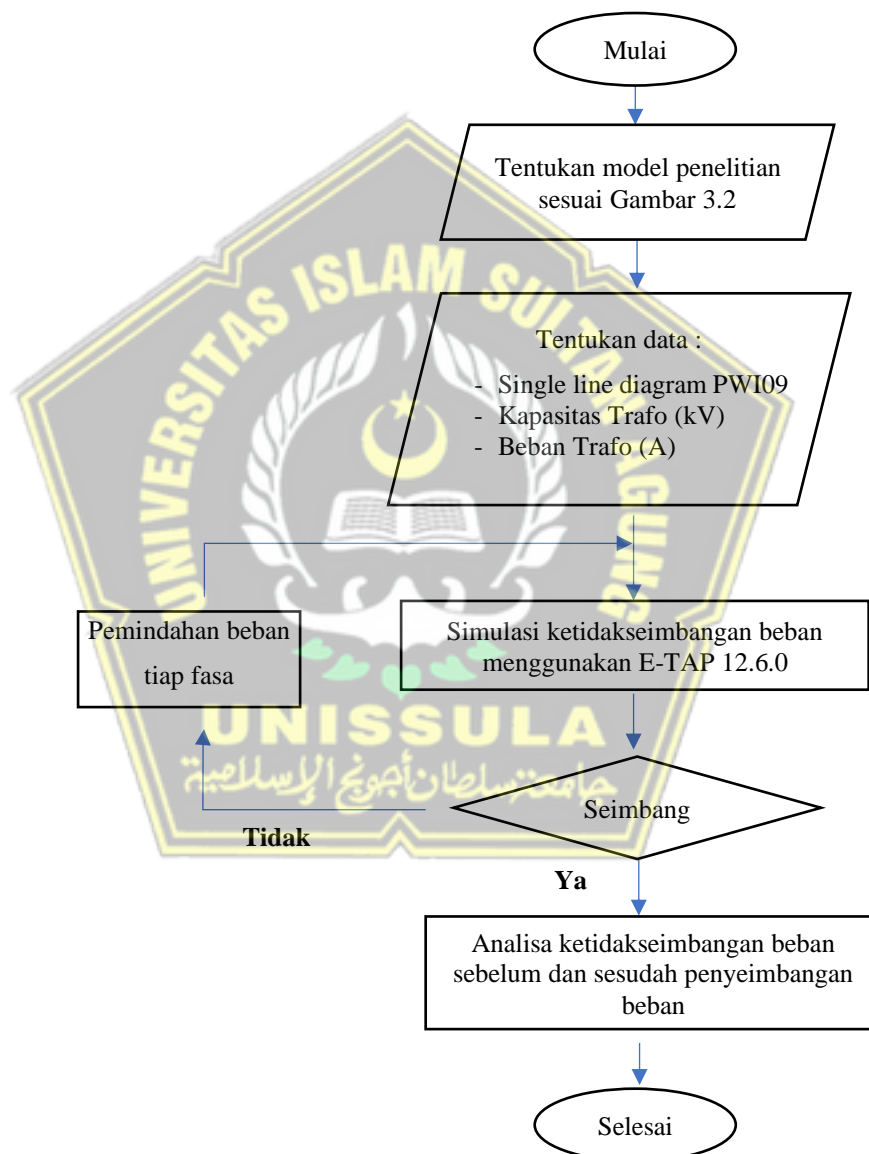


Gambar 3.3 Pemodelan Etap 12.6.0

### 3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur pada penelitian ini secara garis besar dapat digambarkan dengan diagram alir (*flow chart*) pada Gambar 3.4:

#### Diagram Alir Simulasi dan Perhitungan Penelitian



Gambar 3. 4 Flow Chart

## BAB IV

### HASIL DAN ANALISA

#### 4.1 Hasil

##### 4.1.1 Simulasi Ketidakseimbangan Sebelum Penyeimbangan Beban

Simulasi ketidakseimbangan beban dilakukan untuk mendapatkan nilai arus tiap fasa melalui Trafo III Gardu Induk Purwodadi penyulang PWI-09. Sebelum menjalankan simulasi, kita perlu mengisi data transformator dan jaringan distribusi tenaga listrik untuk mendapatkan kondisi yang sesuai dengan data lapangan.

DMengacu pada Gambar 3.2 dan Tabel 3.1, hasil simulasi beban tidak seimbang diperoleh dengan memilih *unbalanced load flow analysis* dan kemudian menjalankan *run unbalanced load flow* pada E-TAP 12.6.0. Tabel 4.1 dibawah ini menunjukkan hasil *Report Manager* E-TAP 12.6.0 sebelum dilakukan penyeimbangan beban.

*Tabel 4. 1 Report Manager E-TAP 12.6.0 sebelum penyeimbangan beban*

Project:  
Location:  
Contract:  
Engineer:  
Filename: Simulasi

Page: 1  
Date: 20-10-2022  
SN:  
Revision: Base  
Config.: Normal

#### Unbalanced Load Flow Report

Bus		Voltage		Generation		Load		Load Flow					XFMR		
ID	kV	Phase	% Mag.	Ang.	MW	Mvar	MW	Mvar	ID	Phase	MW	Mvar	Amp	% PF	% Tap
Bus 20KV	20.000	A	99.489	-30.4	0	0	0	0	Bus PWI09	A	-0.574	-0.358	58.9	84.8	
		B	99.368	-150.5	0	0	0	0		B	-0.711	-0.447	73.2	84.7	
		C	99.287	89.4	0	0	0	0		C	-0.809	-0.504	83.1	84.9	
											N				21.3

Tabel 4.1 menjelaskan bahwa huruf A, B, C, dan N merupakan simbol fasa R, S, T, dan netral. Nilai arus pada bus PWI09 dapat kita lihat yaitu fasa R = 58.9A,

$S = 73.2A$ ,  $T = 83.1A$ , dan  $N = 21.3A$ . Berdasarkan hasil tersebut, nilai arus tiap fasa tidak seimbang sehingga menghasilkan nilai arus netral yang besar. Oleh karena itu dilakukan simulasi pemindahan pada transformator distribusi di PWI09 untuk menghasilkan nilai yang seimbang.

#### 4.1.2 Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan Beban Sebelum

##### Penyeimbangan Beban

Dengan menggunakan data pada Tabel 4.1, kita dapat menghitung persentase ketidakseimbangan beban sebelum penyeimbangan beban. Berikut adalah perhitungan persentase ketidakseimbangan beban sebelum penyeimbangan beban menggunakan persamaan 2.10.

Diketahui:  $I_a = 58.9 A$

$I_b = 73.2 A$

$I_c = 83.1 A$

Perhitungan:

$$\%IUR = \frac{\text{maks} \left[ I_a - \frac{I_a + I_b + I_c}{3}, I_b - \frac{I_a + I_b + I_c}{3}, I_c - \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \right]}{\frac{I_a + I_b + I_c}{3}} \times 100\%$$

$$\%IUR = \frac{\text{maks} [58.9 - 71.73, 73.2 - 71.73, 83.1 - 71.73]}{71.73} \times 100\%$$

$$\%IUR = \frac{\text{maks} [12.83, 1.47, 11.37]}{71.73} \times 100\%$$

$$\%IUR = \frac{12.83}{71.73} \times 100\%$$

$$\%IUR = 17.88\%$$



### 4.1.3 Perhitungan Rugi-rugi Sebelum Penyeimbangan Beban

Penyulang PWI-09 menggunakan sistem 3 fasa 4 kawat dengan jenis kawat penghantar yaitu konduktor AAAC 240 mm<sup>2</sup> untuk penghantar fasa dan AAAC 150 mm<sup>2</sup> untuk penghantar netral. Dengan mengacu pada SPLN 41-8:1981 konduktor AAAC 150 mm<sup>2</sup> mempunyai nilai resistansi sebesar 0.225 Ohm/Km dengan panjang saluran sebesar 10.2 Km.

Berikut perhitungan rugi-rugi sebelum penyeimbangan beban akibat arus netral yang mengalir pada penghantar netral

$$P_N = I_N^2 \times R_N$$

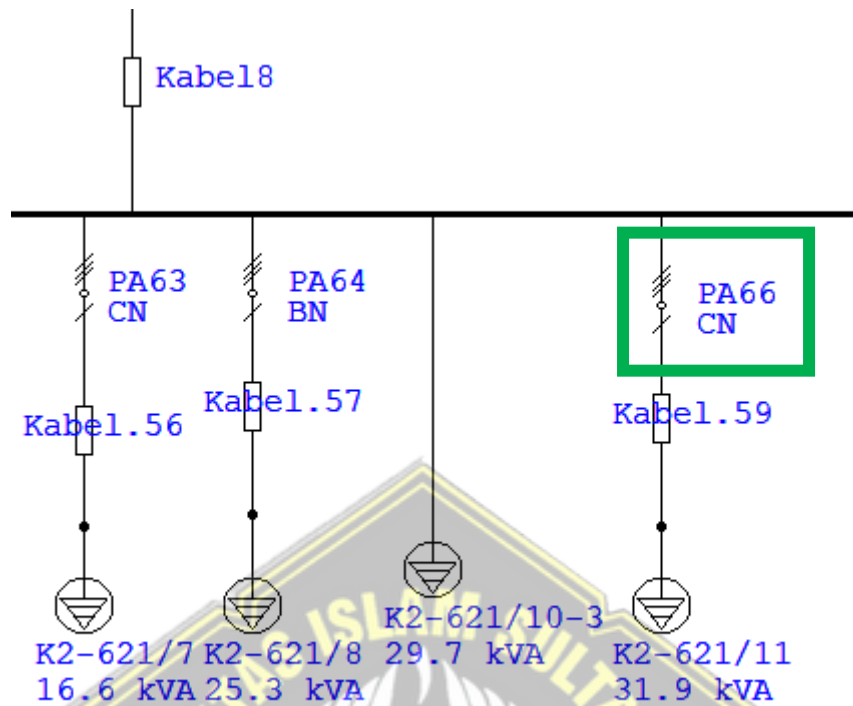
$$P_N = (21.3)^2 \times 0.225$$

$$P_N = 102.08 \text{ W/Km}$$

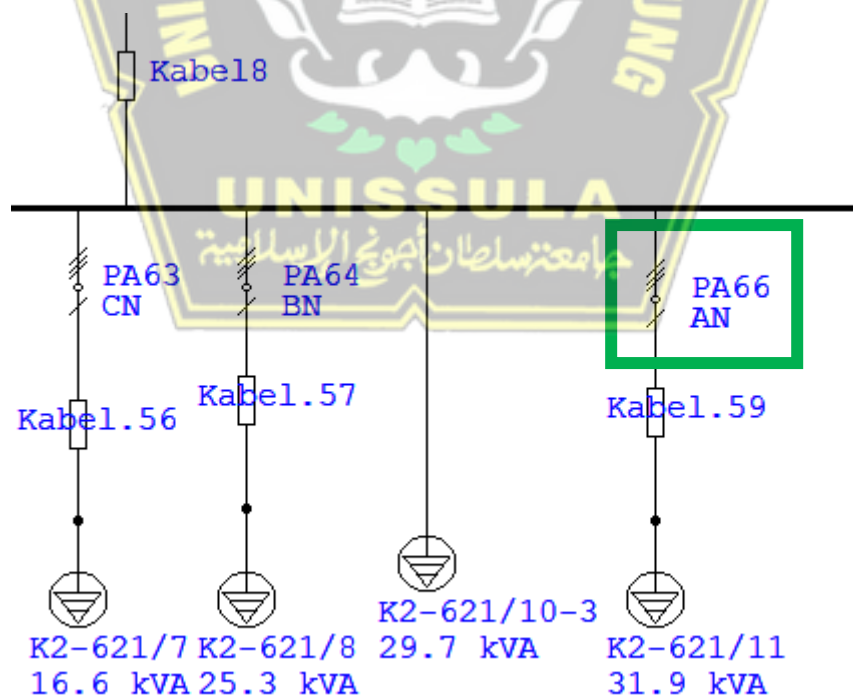
### 4.1.4 Simulasi Aliran Daya Tak Seimbang Sesudah Penyeimbangan Beban

Penyeimbangan beban dilakukan dengan cara memindahkan sambungan Trafo 1 fasa pada fasa lain yang memiliki beban lebih kecil. Pada Tabel 4.1 terlihat bahwa pada fasa T memiliki beban yang paling tinggi, maka dilakukan pemindahan sebagian beban dari fasa T ke fasa R dan fasa S.

Sebagai contoh hubungan fasa Trafo K2-621/11 semula adalah fasa T (CN) kemudian hubungan fasa dipindahkan pada fasa R (AN), artinya beban Trafo K2-621/11 yang semula difasa T sekarang menjadi beban difasa R. Pemindahan hubungan fasa ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.



*Gambar 4.1 Sebelum Pemindahan Fasa*



*Gambar 4.2 Sesudah Pemindahan Fasa*

Tabel 4.2 menunjukkan daftar Trafo yang dilakukan pemindahan fasa setelah dilakukan simulasi pemindahan beban pada PWI-09, sehingga akan diperoleh beban yang seimbang pada tiap fasa.

*Tabel 4. 2 Data Pemindahan Fasa*

No	Nomor Tiang Trafo	Fasa sebelum pemindahan	Fasa sesudah pemindahan
1	K2-621/11	T	R
2	K2-621/16	T	R
3	K2-621/21A	T	R
4	K2-621/21F	T	R
5	K2-621/21F/4	T	R
6	K2-621/21G	T	R
7	K2-621/21G.	T	R

Jalankan simulasi beban tidak seimbang untuk mendapatkan besarnya arus pada masing-masing fasa yang melalui trafo 3 GI Purwodadi. Simulasi berdasarkan data transfer beban yang diasumsikan untuk setiap fasa *feeder* dapat dilakukan di ETAP 12.6. 0 dengan memilih *unbalanced load flow analysis* dan kemudian *run unbalanced load flow*. Tabel 4.3 menunjukkan hasil *Report Manager* ETAP 12.6.0 setelah penyeimbangan dilakukan.

*Tabel 4. 3 Report Manager ETAP 12.6.0 sesudah penyeimbangan beban*

Project:	<b>ETAP</b>	Page:	1
Location:	12.6.0H	Date:	08-11-2022
Contract:		SN:	
Engineer:	Study Case: ULF	Revision:	Base
Filename: Simulasi		Config.:	Normal

**Unbalanced Load Flow Report**

Bus		Voltage			Generation		Load		Load Flow					XFMR	
ID	kV	Phase	% Mag.	Ang.	MW	Mvar	MW	Mvar	ID	Phase	MW	Mvar	Amp	% PF	% Tap
Bus 20KV	20.000	A	99.389	-30.5	0	0	0	0	Bus PWI09	A	-0.689	-0.431	70.8	84.8	
		B	99.369	-150.5	0	0	0	0		B	-0.713	-0.445	73.2	84.8	
		C	99.387	89.5	0	0	0	0		C	-0.692	-0.432	71.1	84.8	
											N				2.3

Dapat dilihat pada Tabel 4.3 bahwa pada Bus PWI09 diperoleh besar arus pada tiap fasa yang sudah seimbang dan arus netral yang lebih kecil yaitu fasa R = 70.8 A, S = 73.2 A, T = 71.1 A dan N = 2.3 A.

#### 4.1.5 Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan Beban Sesudah Penyeimbangan Beban

Dari hasil data simulasi sesudah penyeimbangan beban yang diperoleh pada Tabel 4.3 maka dapat dihitung nilai persentase ketidakseimbangan bebannya menggunakan persamaan 2.10 sebagai berikut :

Diketahui:  $I_a = 70.8 \text{ A}$

$I_b = 73.2 \text{ A}$

$I_c = 71.1 \text{ A}$

Perhitungan:

$$\%IUR = \frac{\text{maks} \left[ I_a - \frac{I_a + I_b + I_c}{3}, I_b - \frac{I_a + I_b + I_c}{3}, I_c - \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \right]}{\frac{I_a + I_b + I_c}{3}} \times 100\%$$

$$\%IUR = \frac{\text{maks} [ 70.8 - 71.7, 73.2 - 71.7, 71.1 - 71.7 ]}{71.7} \times 100\%$$

$$\%IUR = \frac{\text{maks} [ 0.9, 1.5, 0.6 ]}{71.7} \times 100\%$$

$$\%IUR = \frac{1.5}{71.7} \times 100\%$$

$$\%IUR = 2.09\%$$

#### 4.1.6 Perhitungan Rugi-rugi Sesudah Dilakukan Penyeimbangan Beban

Untuk menghitung nilai rugi akibat arus netral yang melalui kawat netral setelah pembagian beban, diperoleh nilai sebagai berikut:

$$P_N = I_N^2 \times R_N$$

$$P_N = (2.3)^2 \times 0.225$$

$$P_N = 1.19 \text{ W/Km}$$

## 4.2 Analisa

Adanya ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi tenaga listrik disebabkan oleh beban-beban satu fasa pada pelanggan jaringan tegangan rendah. Akibat ketidakseimbangan pada masing-masing fasa maka akan timbul arus netral. Hal ini menyebabkan rugi-rugi akibat adanya arus netral yang mengalir pada penghantar netral trafo dan rugi-rugi akibat arus netral yang mengalir ke tanah.

Dari simulasi awal diperoleh data bahwa pada penyulang PWI09 mengalami ketidakseimbangan beban dengan persentase ketidakseimbangan beban hingga 17.88%. Dimana fasa T memiliki beban yang besar sedangkan fasa R memiliki beban yang kecil, sehingga menyebabkan muncul arus netral sebesar 21.3 A. Arus netral ini menyebabkan rugi-rugi daya sebesar 102.08 W/Km. Kemudian simulasi kedua sudah dilakukan pemindahan fasa, dimana fasa T dengan beban tinggi, sebagian bebannya dipindah menjadi fasa R yang memiliki beban kecil sehingga diperoleh beban pada penyulang PWI09 menjadi seimbang dengan persentase ketidakseimbangan beban menjadi 2.09%. Karena beban pada penyulang PWI09 menjadi lebih seimbang maka arus netral yang muncul akan menjadi kecil sebesar 2.3 A dan rugi-rugi daya juga menjadi lebih kecil sebesar 1.19 W/Km.

Dari simulasi terlihat bahwa tingkat ketidakseimbangan beban dapat dikurangi menjadi 2,09% setelah penyeimbangan beban. Nilai ini sesuai dengan kriteria ketidakseimbangan beban maksimum yang diijinkan sebesar 5%.

Dengan menyeimbangkan beban, arus netral juga dapat dikurangi dari 21,3A menjadi 2,3A. Dengan mengurangi arus netral maka rugi-rugi yang diakibatkan oleh arus netral yang mengalir pada trafo dapat dikurangi, sehingga daya listrik dapat terkirim ke konsumen secara maksimal.

Rugi daya sebelum pembagian beban adalah 102,08 W/km dan setelah pembagian beban adalah 1,19 W. Rendahnya nilai rugi-rugi disebabkan oleh penyeimbangan yang dilakukan. Presentase fasa yang seimbang akan sangat tinggi dan arus yang mengalir pada kabel netral akan menjadi sangat kecil.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan data perhitungan dan simulasi pada E-TAP 12.6.0 untuk sebelum dan sesudah penyeimbangan beban pada PWI09 maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Pembebanan tidak seimbang menyebabkan munculnya aliran arus netral pada penghantar netral yang menyebabkan rugi-rugi daya akibat arus netral tersebut, semakin besar ketidakseimbangan beban maka semakin besar rugi-rugi daya akibat arus netral.
2. Persentase ketidakseimbangan beban Trafo 3 Gardu Induk Purwodadi melebihi standar yang ditetapkan oleh PLN, sehingga perlu adanya penyeimbangan pembebanan untuk mendapatkan presentase ketidakseimbangan yang sesuai standar ketetapan PLN.
3. Hasil analisis ketidakseimbangan beban dengan E-TAP 12.6.0 membuktikan adanya arus netral yang muncul, simulasi penyeimbangan pembebanan dengan E-TAP 12.6.0 yang menunjukkan rugi-rugi daya akibat arus netral dapat diperkecil dengan membuat rekonfigurasi jaringan dengan cara pemindahan beban tiap fasa.

#### **5.2 Saran**

Adapun saran yang dapat penulis sampaikan adalah diharapkan pada penyulang PWI09 dilakukan rekonfigurasi jaringan dengan memindah hubungan Trafo 1 fasa agar didapatkan keseimbangan beban, karena apabila ketidakseimbangan beban semakin besar maka akan semakin besar pula arus yang mengalir di netral trafo, dan sebaliknya dimana jika beban dalam keadaan seimbang arus yang mengalir di netral trafo akan semakin kecil dan semakin kecil pula rugi dayanya.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. S. W. Jayabadi, “Analisis Ketidakseimbangan Beban Trafo 1 GI Sronдол Terhadap Rugi-Rugi Akibat Arus Netral Dan Suhu Trafo Menggunakan ETAP 12.6.0,” *J. Transient*, vol. 5, no. 4, pp. 1–7, 2016.
- [2] J. Sentosa Setiadji, T. Machmudsyah, and Y. Isnanto, “Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi,” *J. Tek. Elektro*, vol. 6, no. 1, pp. 68–73, 2008.
- [3] M. Dwiyanto and T. Sogen, “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Transformator Distribusi Di PT PLN (Persero) Area Sorng,” *J. Electro Luceat*, vol. 4, no. 1, pp. 110, 2018.
- [4] Y. Simamora and P. S. M. L. Tobing, “Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi Untuk Identifikasi Beban Lebih Dan Estimasi Rugi-Rugi Pada jaringan Tegangan Rendah,” *Singuda Ensikom*, vol. 7, no. 3, pp. 137–142, 2014.
- [5] M. Dahlan, “Akibat Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Transformator Distribusi,” *Dosen Fak. Tek. Univ. Muria Kudus Sist.*, vol. 1, no. 1979, pp. 1–8, 2012.
- [6] G. A. K. Sari, “Analisa Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo Distribusi Studi Kasus Pada PT. PLN (Persero) Rayon Blora,” Surakarta, 2018.
- [7] W. S. Nugroho, “Mengenal Sistem Tenaga Listrik,” 2017. [Online]. Available: <https://catatanwsn.wordpress.com/2017/11/11/mengenal-sistementenaga-listrik/>.
- [8] A. H. Palba A S, *Sistem Distribusi Daya*. Jakarta: Erlangga, 1991.
- [9] T. Gonen, *Electric Power Transmission System Engineering*. New York, US, 1986.
- [10] M. A. Siregar, “Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Di PT. PLN (Persero) Rayon Panam Pekanbaru,” Pekanbaru, 2013, pp. 5–20.
- [11] Soebagio, *Transformator*. Surabaya: ITS Press, 2012.

- [12] M. D. Patabo, "Pendeteksi arus netral pada trafo distribusi berbasis mikrokontroler," 2016.
- [13] E. P. Nainggolan, "Studi Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Transformator Distribusi," no. 50402023, Medan, 2010, pp. 23–32.
- [14] SPLN D5.004-1, *Regulasi Harmonisa, Flicker, dan Ketidakseimbangan Tegangan*, no. 563. 2012.
- [15] "Tentang ETAP (Electric Transient and Analysis Program) Power Station," Padang, 2013. [Online]. Available: <http://stdlaboratory.blogspot.com/2013/11/tentang-etap-electric-transientand.html>.
- [16] M. Wardana, "Prinsip Kerja Trafo (Transformator) | Trafo dan Bagianbagiannya," 2013. [Online]. Available: <http://meriwardana.blogspot.com/2013/10/prinsip-kerja-trafotransformator-trafo.html>.
- [17] Hutahuruk, T.S., 1996. *Transmisi Daya Listrik*, Jakarta: Penerbit Erlangga.
- [18] Barlian, T., Cekdin, C., 2013. *Transmisi Daya Listrik*, Yogyakarta: C.V.Andi Offset.
- [19] Eryuhanggoro Yugi. *Perancangan Perbaikan Faktor Daya Pada Beban 18.956 kW/6600 V, Menggunakan Kapasitor Bank di PT. Indorama Ventures Indonesia [Tugas Akhir]*. Jakarta:2013.