

**STUDI SUSUT ENERGI PADA SISTEM DISTRIBUSI  
TENAGA LISTRIK MELALUI ANALISIS  
PENGUKURAN DAN PERHITUNGAN**

**SKRIPSI**

Oleh

**DANANG RAMADHIANTO**

**04 04 03 02 53**



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN  
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
GENAP 2007/2008**

## **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

### ***STUDI SUSUT ENERGI PADA SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK MELALUI ANALISIS PENGUKURAN DAN PERHITUNGAN***

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 25 Juni 2008

DANANG .R  
NPM. 04 04 03 02 53

# PENGESAHAN

Skripsi dengan judul :

***STUDI SUSUT ENERGI PADA SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK  
MELALUI ANALISIS PENGUKURAN DAN PERHITUNGAN***

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal Juni 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 25 Juni 2008

Budi Sudiarto ST, MT  
NIP. 040 705 0 181

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur kehadiran Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Tak lupa penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

**Budi Sudiarto ST, MT**

Selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk memberikan saran, bimbingan, pengarahan, dan kemudahan lain dalam penyelesaian skripsi ini. Terima kasih pula kepada kedua orang tua, teman-teman seperjuangan dan rekan-rekan semua yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

2008

Depok, 25 Juni

Penulis

Danang Ramadhianto  
NPM. 0404030253

Danang Ramadhianto  
NPM 0404030253  
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing  
Budi Sudiarto ST, MT

## **STUDI SUSUT ENERGI PADA SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK MELALUI ANALISIS PENGUKURAN DAN PERHITUNGAN**

### **ABSTRAK**

Di dalam suatu sistem tenaga listrik terdapat suatu faktor yang dinamakan faktor rugi rugi atau penyusutan dari energi. Penyusutan ini dapat ditemui di berbagai tempat pada jaringan tenaga listrik, mulai dari pembangkitan, transmisi, sampai dengan kepada distribusi kepada konsumen.

Terdapat dua jenis penyusutan pada sistem tenaga listrik, yaitu penyusutan teknis dan non-teknis. Penyusutan teknis adalah penyusutan yang terjadi sebagai akibat adanya impedansi pada peralatan pembangkitan maupun peralatan penyaluran dalam transmisi dan distribusi sehingga terdapat daya yang hilang. Penyusutan secara non teknis adalah susut yang disebabkan oleh kesalahan dalam pembacaan alat ukur, kesalahan kalibrasi di alat ukur, dan kesalahan akibat pemakaian yang tidak sah (pencurian) atau kesalahan kesalahan yang bersifat administratif lainnya

Penyusutan daya tidak mungkin dihindari karena pada peralatan tidak mungkin memiliki tingkat efisiensi 100%, namun yang perlu mendapatkan perhatian adalah apakah penyusutan yang terjadi di dalam batas kewajaran. Sebagian besar penyusutan yang ada berada pada jaringan distribusi. Hal ini disebabkan karena pada jaringan distribusi, tegangan yang dipakai berada dalam rentang tegangan menengah dan tegangan rendah. Dimana untuk tegangan menengah dan tegangan rendah, arus yang mengalir pada jaringan nilainya besar untuk nilai daya yang sama, sehingga penyusutan energi juga akan besar.

**Kata Kunci : Sistem Tenaga Listrik, Jaringan Distribusi, Susut Energi, Efisiensi.**

Danang Ramadhianto  
NPM 0404030253  
Electrical Engineering Departement

Counsellor  
Budi Sudiarto ST, MT

## **ENERGY LOSSES STUDY ON POWER DISTRIBUTION SYSTEM TROUGH MEASUREMENT AND CALCULATION ANALYSIS**

On power ystem there is a factor known as losses factor of energy. These losses could be found in several places all over power network, from the power plant, transmission system, until the network end in distribution system.

Actually, there are two kinds of losses on power system network, which are technical losses and non-technica losses. Technical losses is losses that happen not only as an effect of impedance on power plant utilities, but also as an effect of impedance on equipment that used in transmission and distribution. In other side, the non-technical losses is a losses that caused by the mistake tha occurred when reading the measurement equipment, the mistake of equipment calibration, and a mistake that caused by illegal user or other administrative mistakes.

We can not avoid energy losses, because the equipment that we used can not possible have 100% efficiency, but there is one thng that should become our primary concern is the losses that occur are still in normal level or not. Mostly the energy losses happen on distribution network. Because on distribution network, the rate of voltage that being used is located in middle voltage and low voltage range. As we know, on middle voltage and low voltage, the amount of current that flow in the cable increasing for the same power. In the simple word, it will cause te energy losses bigger than before.

**Keywords : Power System, Distribution network, Energy losses, Efficiency.**

# DAFTAR ISI

	Hal.
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
	Hal.
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 TUJUAN PENULISAN	2
1.3 BATASAN MASALAH	2
1.4 METODOLOGI PENULISAN	2
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN	2
	Hal.
BAB 2 LANDASAN TEORI	3
2.1 KOMPONEN PADA SISTEM DISTRIBUSI	3
2.2 STRUKTUR JARINGAN DISTRIBUSI	5
2.2.1 Struktur Jaringan Radial	5
2.2.2 Struktur Jaringan Lingkaran	6
2.2.3 Struktur Jaringan Spindel	7
2.2.4 Struktur Jaringan Anyaman	8
2.3 DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK	9
2.3.1 Gardu Distribusi	9
2.3.2 Penyaluran Setempat	10
2.4 TEGANGAN DISTRIBUSI	10

2.4.1 Tegangan Menengah (TM)	10
2.4.2 Tegangan Rendah (TR)	10
2.4.3 Tegangan Pelayanan	10
<b>2.5 KARAKTERISTIK KUALITAS DAYA LISTRIK</b>	<b>13</b>
2.5.1 Kualitas Tegangan	13
2.5.1.1 Fluktuasi Tegangan	13
2.5.1.2 Ketidakseimbangan Tegangan	13
2.5.1.3 Harmonik Tegangan	14
2.5.2 Kualitas Arus	15
2.5.2.1 Harmonik Arus	15
2.5.3 Kualitas Daya	15
2.5.3.1 Puncak Kebutuhan Daya	15
2.5.3.2 Faktor Daya	16
<b>2.6 PENYUSUTAN ENERGI PADA JARINGAN DISTRIBUSI</b>	<b>16</b>
2.6.1 Penyusutan Energi pada Penyulang	17
2.6.1.1 Konduktor Fasa	17
2.6.1.2 Kabel Distribusi	19
2.6.2 Penyusutan Energi pada Transformator Distribusi	24
2.6.3 Penyusutan Energi pada Sambungan (Jointing)	29
	Hal.
<b>BAB 3 PEMILIHAN OBJEK DAN METODE PENGAMBILAN DATA</b>	<b>32</b>
<b>3.1 SUSUT TEKNIS JARINGAN DISTRIBUSI</b>	<b>32</b>
3.1.1 Susut Jaringan Tegangan Menengah (JTM)	32
3.1.1.1 Penyulang Sotong	33
3.1.1.2 Penyulang Anggrek	35
3.1.2 Susut Jaringan Tegangan Rendah (JTR)	37
3.1.3 Susut Gardu Distribusi	38
	Hal.
<b>BAB 4 PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA</b>	<b>42</b>
<b>4.1 HASIL SUSUT JARINGAN TEGANGAN MENENGAH</b>	<b>42</b>



4.1.1 Penyulang Anggrek	42
4.1.1.1 Simulasi Penyulang Anggrek	45
4.1.2 Penyulang Sotong	47
4.1.2.1 Simulasi Penyulang Sotong	49
4.2 HASIL SUSUT JARINGAN TEGANGAN RENDAH	51
4.2.1 Outgoing Rak TR	52
4.2.2 kWh Meter Pelanggan	53
4.2.3 Susut Jaringan Tegangan Rendah	53
4.2.4 Perbandingan Susut pada kWh meter dengan Susut pada PHB	60
4.3 HASIL SUSUT ENERGI PADA GARDU DISTRIBUSI	63
4.3.1 Susust Energi pada Rak TR	66
4.3.2 Susut Energi pada Transformator Distribusi	68
	Hal.
BAB 5 KESIMPULAN	69
DAFTAR ACUAN	70
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN	

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Gambar Komponen Penyusun Sistem Distribusi	4
<b>Gambar 2.2</b>	Gambar Struktur Jaringan Radial	5
<b>Gambar 2.3</b>	Gambar Struktur Jaringan Radial Ganda	6
<b>Gambar 2.4</b>	Gambar Struktur Jaringan Lingkaran/loop	7
<b>Gambar 2.5</b>	Gambar Struktur Jaringan Spindel	8
<b>Gambar 2.6</b>	Gambar Struktur Jaringan Anyaman	9
<b>Gambar 2.7</b>	Standar NEMA <i>Temperature Rise</i> terhadap Voltage Imbalance	14
<b>Gambar 2.8</b>	Standar NEMA <i>Derating Factor</i> terhadap Voltage Imbalance	14
<b>Gambar 2.9</b>	Gelombang Harmonik	15
<b>Gambar 2.10</b>	Gambar Penampang Kabel Distribusi	19
<b>Gambar 2.11</b>	Diagram Fasa Jatuh Tegangan Akibat Daya Reaktif	23
<b>Gambar 2.12</b>	Diagram Fluks yang Dibangkitkan Transformator	25
<b>Gambar 2.13</b>	Gambar Rangkaian Ganti Transformator	26
<b>Gambar 3.1</b>	Letak AMR untuk Pengukuran Susut pada JTM	32
<b>Gambar 3.2</b>	Diagram Satu Garis Penyulang Sotong	34
<b>Gambar 3.3</b>	Diagram Satu Garis Penyulang Angrek	36
<b>Gambar 3.4</b>	Letak Alat Ukur untuk Pengukuran Susut pada JTR	37
<b>Gambar 3.5</b>	Peta Jaringan Tegangan Rendah (JTR) pada Gardu B233	38
<b>Gambar 3.6</b>	Letak PQA pada Rak TR untuk Pengukuran Susut Rak TR	39
<b>Gambar 3.7</b>	Peta Lokasi Gardu Distribusi B 233	40
<b>Gambar 3.8</b>	Letak AMR pada Gardu Distribusi untuk Pengukuran Susut Transformator Distribusi	41
<b>Gambar 4.1</b>	Kondisi Tiang Listrik Miring	48
<b>Gambar 4.2</b>	Kondisi JTR yang Tidak Rapih (a) (b)	49
<b>Gambar 4.3</b>	Diagram Waktu Pengukuran Energi di JTR	49
<b>Gambar 4.4</b>	Skema Pengambilan Data Susut JTR	51

<b>Gambar 4.5</b>	Perbandingan Susut JTR melalui Pengukuran dan Perhitungan	53
<b>Gambar 4.6</b>	Grafik Tegangan Fasa Jurusan 8	54
<b>Gambar 4.7</b>	Grafik Tegangan Fasa PHB 8	54
<b>Gambar 4.8</b>	Grafik Arus pada Jurusan 8	56
<b>Gambar 4.9</b>	Grafik Arus pada PHB 8	56
<b>Gambar 4.10</b>	Perbandingan Susut pada JTR	58
<b>Gambar 4.11</b>	Kondisi kWh meter Pelanggan (a) (b)	59
<b>Gambar 4.12</b>	Kondisi Fisik Rak TR di GD B 233	62



## DAFTAR TABEL

	Hal.
<b>Tabel 2.1.</b> Perbandingan Keuntungan Kerugian Tegangan Tinggi pada Jaringan Distribusi	11
<b>Tabel 2.2.</b> Faktor Kunci Isolasi pada Berbagai Macam Kabel	21
<b>Tabel 2.3.</b> Hubungan Antara Material Penyusun Transformator dengan Rugi Ruginya	28
<b>Tabel 3.1.</b> Data Karakteristik Penyulang Sotong	33
<b>Tabel 3.2.</b> Data Karakteristik Penyulang Anggrek	35
<b>Tabel 3.3.</b> Objek Studi Susut Transformator Distribusi	41
<b>Tabel 4.1.</b> Data Energi Penyulang Anggrek dan Penyulang Sotong	42
<b>Tabel 4.2.</b> Data Energi Gardu Gardu Penyulang Anggrek	43
<b>Tabel 4.3.</b> Data Susut Energi pada Penyulang Anggrek	43
<b>Tabel 4.4.</b> Data Energi Gardu Gardu Penyulang Sotong	45
<b>Tabel 4.5.</b> Data Susut Energi pada Penyulang Sotong (a)	46
<b>Tabel 4.6.</b> Data Susut Energi pada Penyulang Sotong (b)	47
<b>Tabel 4.7.</b> Hasil Pengukuran Energi Outgoing Rak TR	50
<b>Tabel 4.8.</b> Energi Terpakai oleh Pelanggan Berdasarkan Pembacaan kWh Meter	50
<b>Tabel 4.9.</b> Hasil Pengukuran Susut Jaringan Tegangan Rendah	50
<b>Tabel 4.10.</b> Penyusutan Energi pada JTR	52
<b>Tabel 4.11.</b> Hasil Penyusutan JTR Melalui Perhitungan	52
<b>Tabel 4.12.</b> Hasil Pengukuran Tegangan Fasa	54
<b>Tabel 4.13.</b> Perbandingan Rata Rata Arus pada Jurusan 8 dan PHB 8	57
<b>Tabel 4.14.</b> Spesifikasi Rak TR di Gardu B 233	60
<b>Tabel 4.15.</b> Kondisi Fisik Rak TR di GD B 233 Berdasarkan Pengamatan	61
<b>Tabel 4.16.</b> Hasil Pengukuran Temperatur di Rak TR GD B 233	61
<b>Tabel 4.17.</b> Perhitungan Susut Energi pada Rak TR	63
<b>Tabel 4.18.</b> Hasil Pengukuran Rak Tegangan Rendah	64
<b>Tabel 4.19.</b> Susut Energi pada Rak TR	64
<b>Tabel 4.20.</b> Hasil Pengukuran Susut pada Transformator Distribusi	65

## DAFTAR LAMPIRAN

	Hal
<b>Lampiran A</b> Data Gardu Penyulang Anggrek dan Sotong	A-1
<b>Lampiran B</b> Data Pelanggan TM	B-1
<b>Lampiran C</b> Simulasi ETAP Feeder Anggrek	C-1
<b>Lampiran D</b> Simulasi ETAP Feeder Sotong	D-1



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. LATAR BELAKANG MASALAH

Di dalam suatu sistem tenaga listrik terdapat suatu faktor yang dinamakan faktor rugi rugi atau penyusutan dari daya. Penyusutan ini dapat ditemui di berbagai tempat pada jaringan tenaga listrik, mulai dari pembangkitan, transmisi, sampai dengan kepada distribusi kepada konsumen.

Penyusutan menjadi pembahasan penting pada saat ini karena terkait dengan kualitas daya yang akan dihantarkan kepada konsumen serta membuka potensi pendapatan bagi Perusahaan Listrik Negara (PLN) karena rugi rugi yang terjadi di jaringan akan mengurangi potensi penjualan daya oleh PLN.

Secara umum penyusutan daya dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu :

1. Susut teknis

Penyusutan teknis adalah penyusutan yang terjadi sebagai akibat adanya impedansi pada peralatan pembangkitan maupun peralatan penyaluran dalam transmisi dan distribusi sehingga terdapat daya yang hilang berupa panas.

2. Susut non teknis

Penyusutan secara non teknis adalah susut yang disebabkan oleh kesalahan dalam pembacaan alat ukur, kesalahan kalibrasi di alat ukur, dan kesalahan akibat pemakaian yang tidak sah (pencurian) atau kesalahan kesalahan yang bersifat administratif lainnya.

Akan tetapi perlu diketahui bahwa penyusutan daya tidak mungkin dihindari karena pada peralatan tidak mungkin memiliki tingkat efisiensi 100%, namun yang perlu mendapatkan perhatian adalah apakah penyusutan yang terjadi di dalam batas kewajaran. Sebagian besar penyusutan yang ada di duga berada pada jaringan distribusi. Hal ini disebabkan karena pada jaringan distribusi tegangan yang dipakai berada dalam rentang tegangan menengah dan tegangan rendah. Dimana untuk tegangan menengah dan tegangan rendah, arus yang mengalir pada jaringan nilainya besar, sehingga penyusutan daya  $I^2R$  juga akan besar.

## **1.2. TUJUAN PENULISAN**

Tujuan penulisan skripsi ini adalah untuk mengetahui besarnya susut energi yang terjadi pada jaringan distribusi tenaga listrik serta melakukan analisa terhadap nilai susut energi tersebut, melalui metode pengukuran serta perhitungan kemudian membandingkan hasil keduanya.

## **1.3. BATASAN MASALAH**

Untuk memudahkan perumusan dan penyelesaian masalah yang dibahas pada skripsi ini, maka diperlukan pembatasan masalah. Batasan masalah pada studi susut energi ini adalah pembahasan hanya mencakup susut teknis pada jaringan distribusi, yaitu pada jaringan tegangan menengah, gardu gardu distribusi, dan jaringan tegangan rendah.

## **1.4. METODOLOGI PENELITIAN**

Penulisan diawali dengan pembahasan literatur tentang komponen penyusun serta tipe tipe jaringan distribusi tenaga listrik. Selanjutnya dilanjutkan dengan bagian bagian dari jaringan distribusi yang mengalami nilai susut energi. Setelah itu dilakukan pengukuran serta membandingkan dengan hasil perhitungan.

## **1.5. SISTEMATIKA PENULISAN**

Bab satu ini merupakan pendahuluan yang membahas mengenai latar belakang, tujuan penulisan, batasan masalah dan sistematika penulisan untuk memberikan gambaran umum mengenai penulisan skripsi ini. Sementara Bab dua merupakan dasar teori yang berisikan jenis jenis susut teknis yang terjadi pada jaringan distribusi yang terdiri dari susut pada penyulang, susut pada transformator distribusi, dan susut pada persambungan (jointing).

Bab tiga ini berisi tentang pemilihan objek studi susut serta metode yang digunakan dalam pengambilan data penyusutan energi pada jaringan tegangan menengah dan jaringan tegangan rendah. Bab empat merupakan pengolahan data dan analisa yang berisi tentang analisa atas hasil pengolahan data penyusutan energi dan perbandingannya dengan hasil perhitungan susut energi.

Dan yang terakhir adalah Bab lima, dimana bab ini berisi tentang kesimpulan hasil perbandingan hasil penyusutan energi dengan hasil perhitungan penyusutan energi.





## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 KOMPONEN PADA SISTEM DISTRIBUSI**

Sistem distribusi adalah keseluruhan komponen dari sistem tenaga listrik yang menghubungkan secara langsung antara sumber daya yang besar (seperti pada gardu transmisi) dengan konsumen tenaga listrik [1]. Secara umum yang termasuk ke dalam sistem distribusi antara lain :

1. Gardu Induk

Gardu Induk merupakan unit di dalam sistem distribusi yang berfungsi untuk menerima daya dari sistem transmisi untuk kemudian diteruskan sistem distribusi. Di dalam Gardu Induk ini tegangan dari sistem transmisi (150 kV-500 kV) akan diubah menjadi tegangan untuk distribusi (20 kV) [1].

2. Jaringan Subtransmisi

Jaringan subtransmisi merupakan jaringan yang berfungsi untuk mengalirkan daya dari GI menuju gardu gardu distribusi. Namun jaringan subtransmisi belum tentu ada di seluruh sistem distribusi, karena jaringan subtransmisi merupakan jaringan dengan tegangan peralihan. Seandainya pada jaringan transmisi tegangan yang dipakai adalah 500 kV, maka setelah masuk GI tegangan menjadi 150 kV (belum termasuk tegangan untuk distribusi). Sehingga jaringan ini dinamakan subtransmisi karena masih bertegangan tinggi [1].

3. Gardu Distribusi Utama

Gardu distribusi merupakan unit dalam sistem distribusi yang berfungsi untuk menyalurkan daya dari GI atau dari jaringan subtransmisi untuk kemudian disalurkan kepada penyulang primer atau langsung kepada konsumen [1].

#### 4. Saluran Penyulang Utama

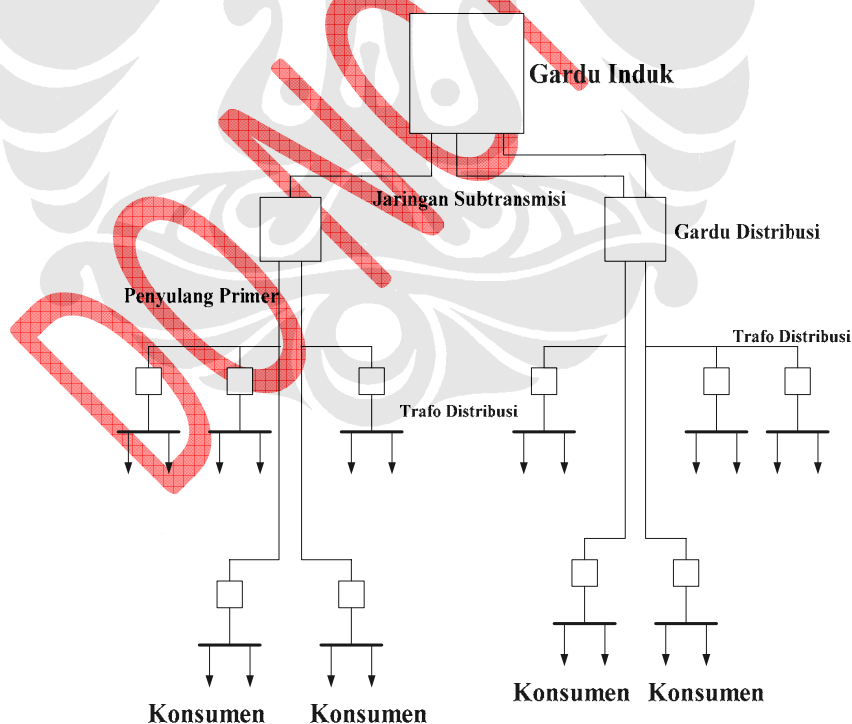
Saluran penyulang utama merupakan rangkaian yang berfungsi untuk menghubungkan antara gardu distribusi utama dengan gardu transformator distribusi atau menghubungkan GI dengan gardu transformator distribusi [1].

#### 5. Transformator Distribusi

Transformator Distribusi berada di dalam gardu gardu distribusi. Berfungsi untuk mengubah tegangan menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah (220/380 V). Kemudian daya dengan tegangan rendah tersebut disalurkan kepada konsumen [1].

#### 6. Rangkaian Sekunder

Rangkaian sekunder merupakan rangkaian yang berasal dari gardu gardu distribusi yang berfungsi untuk melayani konsumen yang tersebar di sepanjang simpul simpul distribusi [1].



**Gambar 2.1.** Gambar Komponen Penyusun Sistem Distribusi

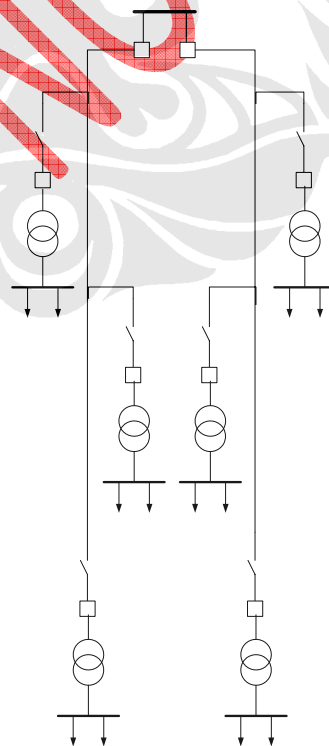
## 2.2 STRUKTUR JARINGAN DISTRIBUSI

Pada umumnya struktur jaringan distribusi dapat dibagi menjadi empat jenis, antara lain :

1. Jaringan radial
2. Jaringan lingkaran
3. Jaringan spindel
4. Jaringan anyaman

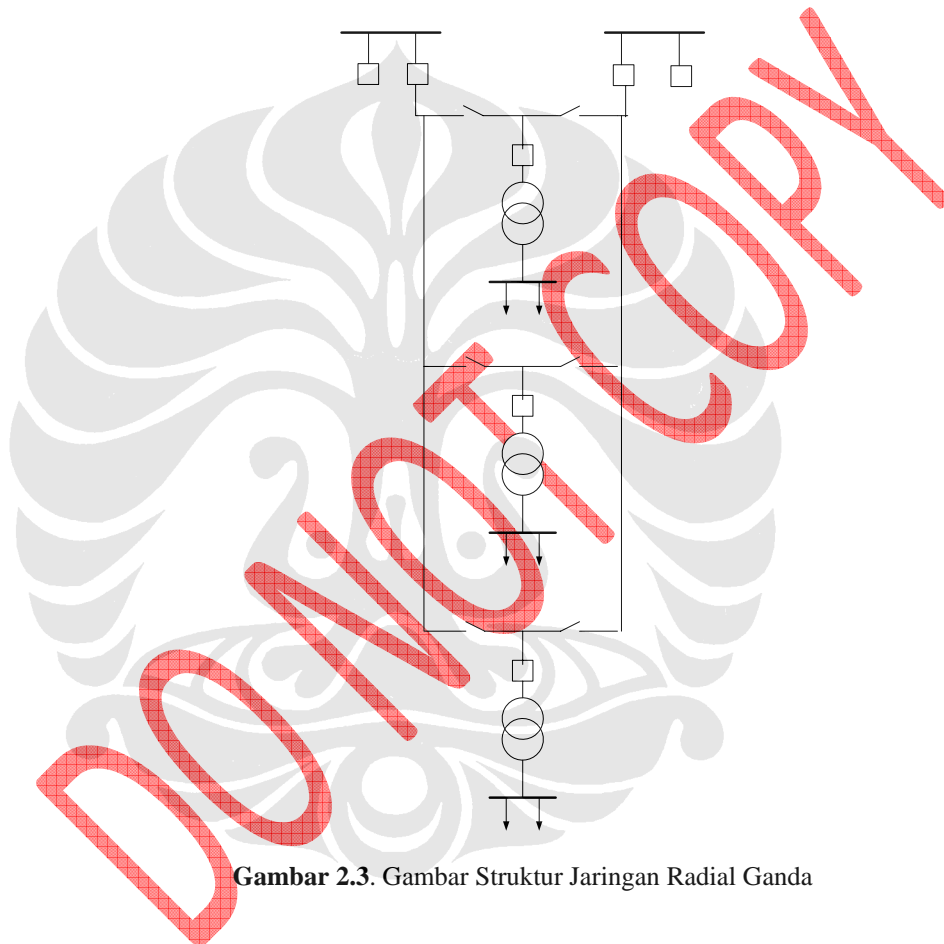
### 2.2.1 Struktur Jaringan Radial

Struktur jaringan distribusi radial adalah struktur jaringan yang paling sederhana, baik ditinjau dari perencanaannya maupun dari pengusahaannya. Penyaluran tenaga listrik dari penyulang berada pada kondisi satu arah. Akibatnya apabila terjadi gangguan pada salah satu titik pada rangkaian akan menyebabkan keseluruhan jaringan akan terkena dampaknya. Dengan demikian kontinuitas penyaluran tenaga listrik pada jaringan dengan struktur seperti ini sangat buruk. Karena apabila terjadi perbaikan pada salah satu titik akan menyebabkan seluruh jaringan harus dipadamkan.



**Gambar 2.2.** Gambar Struktur Jaringan Radial

Untuk kontinuitas penyaluran yang lebih baik, maka struktur jaringan seperti ini dikembangkan menjadi struktur jaringan radial ganda. Pada struktur jaringan radial ganda, setiap gardu distribusi mendapat suplai dari dua penyulang radial yang berasal dari GI atau dari gardu distribusi lainnya. Dalam keadaan operasi normal, maka gardu hanya mendapat suplai tenaga listrik dari satu penyulang saja. Namun apabila terjadi gangguan, maka jaringan akan dipindahkan ke penyulang lainnya. Sehingga kontinuitas penyaluran tenaga listrik dapat diperbaiki.

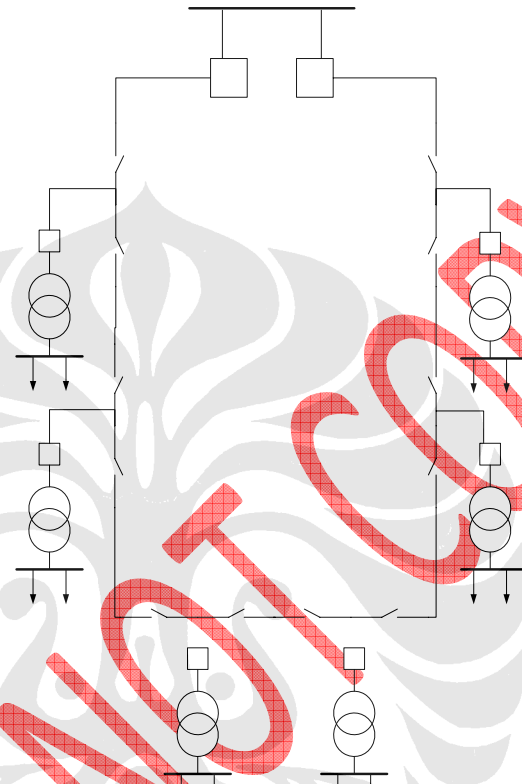


**Gambar 2.3.** Gambar Struktur Jaringan Radial Ganda

### 2.2.2 Struktur Jaringan Lingkaran

Struktur jaringan distribusi lingkaran merupakan struktur jaringan distribusi tertutup yang dimulai dari sumber daya besar (GI) kemudian melewati beberapa gardu gardu distribusi kemudian kembali lagi menuju sumber semula sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.4. Kelebihan utama dari struktur jaringan distribusi ini adalah apabila terjadi gangguan, maka gangguan tersebut dapat diisolir sehingga tidak mengganggu jaringan distribusi secara keseluruhan. Hal ini dapat terjadi karena pada struktur jaringan distribusi lingkaran ini terdapat

dua titik yang dapat disambungkan secara bergantian atau secara bersamaan. Sehingga kontinuitas penyalurannya sudah cukup baik. Walaupun apabila terjadi gangguan pada banyak titik pada rangkaian / serentak, maka keseluruhan jaringan dapat terganggu juga.

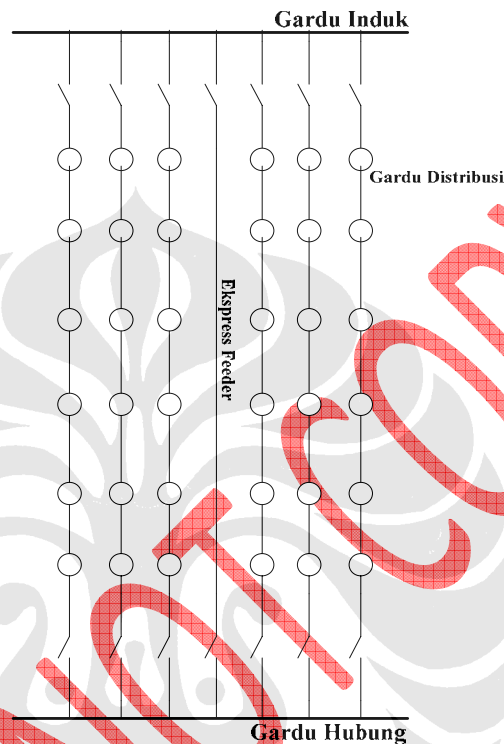


**Gambar 2.4.** Gambar Struktur Jaringan Lingkaran/Loop

### 2.2.3 Struktur Jaringan Spindel

Struktur jaringan spindel merupakan hasil pengembangan dari struktur jaringan distribusi radial dan struktur jaringan distribusi lingkaran. Pada struktur jaringan spindel ini penyulang utama yang dipakai bertambah banyak jumlahnya serta memiliki penyulang cadangan. Konfigurasi yang umum dipakai untuk struktur jaringan distribusi spindel adalah tujuh buah penyulang utama dan satu buah penyulang cadangan. Seluruh penyulang ini bertemu pada satu titik yang menghubungkan seluruh penyulang penyulang utama dengan penyulang cadangan. Penyulang cadangan merupakan saluran khusus yang dilengkapi pemutus dan pemisah daya. Titik temu penyulang penyulang utama dengan

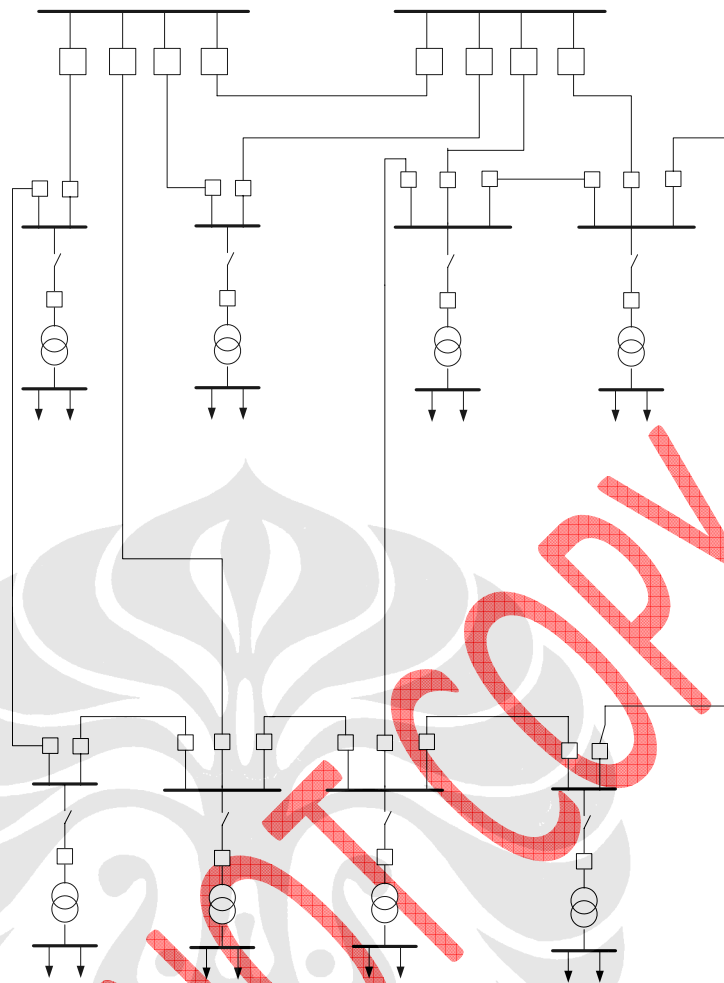
penyulang cadangan berada pada sebuah gardu hubung. Penyulang cadangan berfungsi sebagai penyalur tenaga listrik darurat apabila saluran penyulang utama ada yang mengalami gangguan. Dalam keadaan operasi normal, maka penyulang cadangan ini tidak terhubung dengan beban.



Gambar 2.5. Gambar Struktur Jaringan Spindel

#### 2.2.4 Struktur Jaringan Anyaman

Struktur jaringan distribusi anyaman merupakan bentuk jaringan yang paling rumit apabila dibandingkan dengan struktur jaringan distribusi lainnya. Untuk setiap gardu distribusi akan mendapat suplai tenaga listrik dari dua atau lebih penyulang, sehingga kontinuitas penyaluran tenaga listriknya jauh lebih baik dibandingkan struktur jaringan distribusi yang lain. Namun struktur jaringan distribusi jenis ini memiliki biaya investasi yang lebih mahal dibandingkan dengan struktur jaringan distribusi lainnya. Struktur ini biasanya dipakai untuk daerah yang memerlukan tingkat kontinuitas penyaluran tenaga listrik yang tinggi seperti pada daerah industri yang memerlukan suplai yang konstan.



**Gambar 2.6.** Gambar Struktur Jaringan Anyaman

## 2.3 DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

Terdapat dua cara dalam distribusi tenaga listrik ke daerah pemukiman, antara lain melalui gardu gardu distribusi atau melalui penyaluran setempat.

### 2.3.1 Gardu Distribusi

Penyaluran daya dengan menggunakan gardu distribusi menggunakan sistem tiga fasa untuk jaringan tegangan menengah (JTM) dan jaringan tegangan rendah (JTR) dengan transformator tiga fasa dengan kapasitas yang cukup besar. Jaringan tegangan rendah ditarik dari sisi sekunder transformator untuk kemudian disalurkan kepada konsumen. Sistem tiga fasa tersedia untuk seluruh daerah pelayanan distribusi, walaupun sebagian besar konsumen mendapat pelayanan distribusi tenaga listrik satu fasa. Jaringan tegangan menengah berpola radial

dengan kawat udara sistem tiga fasa tiga kawat. Sementara jaringan tegangan rendah berpola radial dengan sistem tiga fasa empat kawat dengan netral.

### **2.3.2 Penyaluran Setempat**

Penyaluran daya dengan menggunakan penyaluran setempat umumnya digunakan pada daerah-daerah dengan kondisi beban perumahan tidak terlalu besar, atau pada suatu daerah dengan tingkat pertumbuhan beban yang tinggi. Untuk jaringan tegangan menengahnya menggunakan sistem tiga fasa dengan percabangan satu fasa. Sementara untuk jaringan tegangan menengahnya menggunakan sistem satu fasa. Transformator yang digunakan memiliki kapasitas yang kecil dan cenderung dekat dengan konsumen. Jaringan tegangan menengah berpola radial dengan kawat udara sistem tiga fasa empat kawat dengan netral. Sementara jaringan tegangan rendah berpola radial dengan sistem tiga fasa tiga kawat bersama netral.

## **2.4 TEGANGAN DISTRIBUSI**

Tegangan untuk jaringan distribusi dapat dibagi menjadi beberapa jenis, antara lain :

### **2.4.1 Tegangan Menengah (TM)**

Tegangan menengah adalah tegangan dengan rentang nilai 1 kV sampai dengan 30 kV. Untuk di Indonesia menggunakan tegangan menengah sebesar 20 kV. Tegangan menengah dipakai untuk penyaluran tenaga listrik dari GI menuju gardu gardu distribusi atau langsung menuju pelanggan tegangan menengah.

### **2.4.2 Tegangan Rendah (TR)**

Tegangan rendah adalah tegangan dengan nilai dibawah 1 kV yang digunakan untuk penyaluran daya dari gardu gardu distribusi menuju pelanggan tegangan rendah. Penyalurannya dilakukan dengan menggunakan sistem tiga fasa empat kawat yang dilengkapi netral. Di Indonesia menggunakan tegangan rendah 380/220 V. Dengan 380 V merupakan besar tegangan antar fasa dan tegangan 220 V merupakan tegangan fasa-netral.

### **2.4.3 Tegangan Pelayanan**



Tegangan pelayanan merupakan ketetapan dari penyedia tenaga listrik untuk pelanggan pelanggannya. Di Indonesia besarnya tegangan pelayanan pada umumnya antara lain :

- a. 380/220 V tiga fasa empat kawat
- b. 220 V satu fasa dua kawat
- c. 6 kV tiga fasa tiga kawat
- d. 12 kV tiga fasa tiga kawat
- e. 20 kV tiga fasa tiga kawat

Selama beberapa tahun terakhir ini sistem distribusi mengarah kepada sistem dengan tegangan yang lebih tinggi. Dengan tegangan sistem distribusi yang lebih tinggi, maka sistem dapat membawa daya lebih besar dengan nilai arus yang sama. Arus yang lebih kecil berarti jatuh tegangan yang lebih kecil, rugi rugi yang lebih sedikit dan kapasitas membawa daya yang lebih besar [2].

Keuntungan	Kerugian
Jatuh tegangan akan lebih kecil pada sistem dengan tegangan yang lebih tinggi	Rangkaian yang lebih panjang, maka akan lebih sering terdapat gangguan pada pelanggan
Sistem dengan tegangan yang lebih tinggi dapat membawa daya yang lebih besar	Pemeliharaan dan perbaikan dilakukan pada sistem bertegangan tinggi lebih berbahaya
Untuk daya yang tetap, sistem dengan tegangan yang lebih tinggi memiliki rugi rugi saluran yang lebih kecil	Biaya perlengkapan untuk sistem dengan tegangan yang lebih tinggi, seperti isolasi kabel sampai pada transformatornya, akan lebih mahal
Dengan jatuh tegangan yang lebih kecil dan kapasitas yang lebih besar, maka sistem dengan tegangan yang lebih kecil dapat menjangkau daerah yang lebih luas	
Karena jangkauan yang lebih luas, maka pada sistem dengan tegangan yang lebih tinggi, gardu gardu yang digunakan akan lebih sedikit	

**Tabel 2.1.** Tabel Perbandingan Keuntungan Kerugian Tegangan Tinggi pada Jaringan Distribusi

Sistem distribusi dengan tegangan yang lebih besar membutuhkan regulator tegangan dan kapasitor untuk pendukung tegangan yang lebih sedikit.

Perlengkapan yang digunakan juga membutuhkan konduktor yang lebih kecil atau dapat membawa daya yang lebih besar untuk konduktor yang berukuran sama pada sistem distribusi dengan tegangan yang lebih tinggi [2]. Keuntungan sistem distribusi dengan tegangan yang lebih tinggi dapat dilihat pada persamaan berikut:

#### 1. Daya

Untuk arus yang sama, daya akan berbanding lurus dengan tegangan.

$$P_2 = \frac{V_2}{V_1} P_1 \quad (2.1)$$

Ketika  $I_1 = I_2$

#### 2. Arus

Untuk daya yang sama, peningkatan tegangan akan berbanding lurus dengan penurunan besarnya arus.

$$I_2 = \frac{V_1}{V_2} I_1 \quad (2.2)$$

Ketika  $P_2 = P_1$

#### 3. Jatuh tegangan

Untuk daya yang dihantarkan sama, maka persentase jatuh tegangan berubah sesuai dengan perbandingan tegangan dikuadratkan. Rangkaian dengan tegangan 20 kV memiliki persentase jatuh tegangan lebih besar daripada rangkaian dengan tegangan 40 kV dengan beban yang sama.

$$V_{\%2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^2 V_{\%1} \quad (2.3)$$

#### 4. Luas Area Pelayanan

Untuk kepadatan beban yang sama, ruang lingkup akan semakin meningkat seiring dengan peningkatan tegangan. Sistem 440 V dapat mencakup wilayah dua kali daripada wilayah yang dapat dicakup oleh sistem 220 V.

$$A_2 = \frac{V_2}{V_1} A_1 \quad (2.4)$$

Dimana

$V_1, V_2$  = Tegangan pada rangkaian 1 dan 2

- $P_1, P_2$  = daya pada rangkaian 1 dan 2  
 $I_1, I_2$  = Arus pada rangkaian 1 dan 2  
 $V_{\%1}, V_{\%2}$  = Jatuh tegangan/panjang unit (persen) pada rangkaian 1 dan 2  
 $A_1, A_2$  = Ruang lingkup dari rangkaian 1 dan 2

## **2.5. KARAKTERISTIK KUALITAS DAYA LISTRIK**

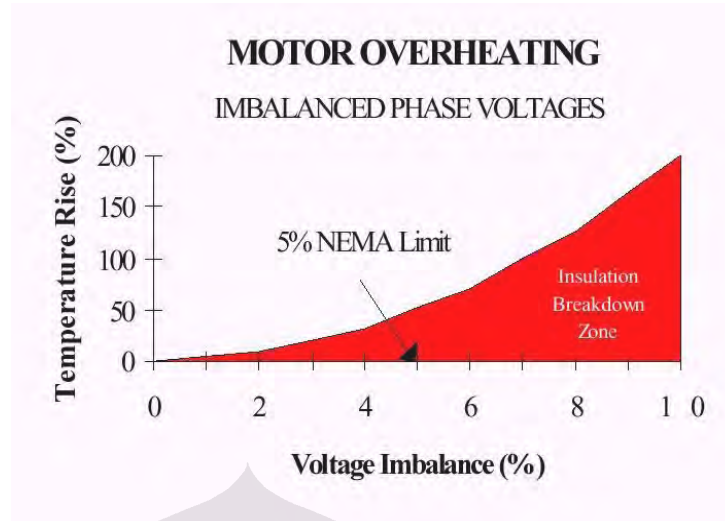
### **2.5.1. Kualitas Tegangan**

#### **2.5.1.1. Fluktuasi Tegangan (Voltage Fluctuation)**

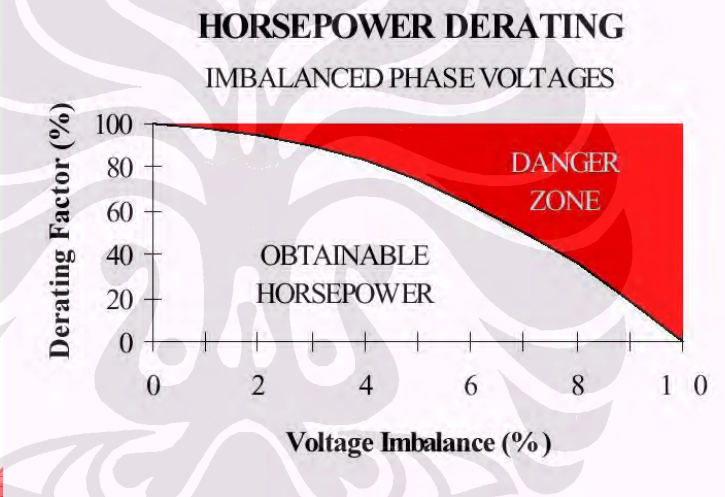
Fluktuasi tegangan merupakan rentang perubahan tegangan maksimum dan minimum. Besarnya tegangan sangat mempengaruhi operasi dari suatu peralatan, apabila tegangan yang disuplai ke peralatan melebihi tegangan nominalnya maka akan terjadi beberapa kerugian diantaranya adalah timbulnya arus yang melebihi nominalnya, hal ini selain akan memperburuk operasi peralatan juga dapat memperpendek life time peralatan tersebut. Demikian pula sebaliknya, apabila tegangan yang disuplai ke peralatan lebih rendah dari tegangan nominalnya maka akan menyebabkan operasi peralatan yang buruk, bahkan dapat menyebabkan peralatan tidak dapat beroperasi (apabila tegangan kurang dari tegangan start peralatan) [3]. Toleransi tegangan lebih pada sisi beban-beban listrik adalah +/- 10 % dari tegangan nominal.

#### **2.5.1.2. Ketidakseimbangan Tegangan (Voltage Imbalance)**

Ketidakseimbangan Tegangan terjadi apabila tegangan tiap fasa mempunyai besar dan sudut tegangan yang tidak standar, sehingga tegangan antar fasa menjadi tidak sama. Ketidakseimbangan Tegangan sangat mempengaruhi operasi beban tiga fasa (seperti motor, trafo dsb). Hal ini akan menyebabkan timbulnya peningkatan temperatur, konsumsi kwh dan penurunan kemampuan operasi (*derating capacity*) seperti terlihat pada standar NEMA pada gambar 2.7 dan 2.8. Apabila terjadi ketidakseimbangan tegangan sebesar +/- 5% maka akan meningkatkan temperatur sebesar 50%, di mana hal ini membutuhkan energi listrik +/- sebesar 10% dari kebutuhan daya totalnya [3]. Bahkan pada motor-motor listrik akan mengakibatkan *derating capacity* motor listrik tersebut, dengan kata lain akan menurunkan kemampuan maksimal dari motor listrik tersebut.



Gambar 2.7. Standar NEMA *Temperature Rise* terhadap *Voltage Imbalance*



Gambar 2.8. Standar NEMA *Derating Factor* terhadap *Voltage Imbalance*

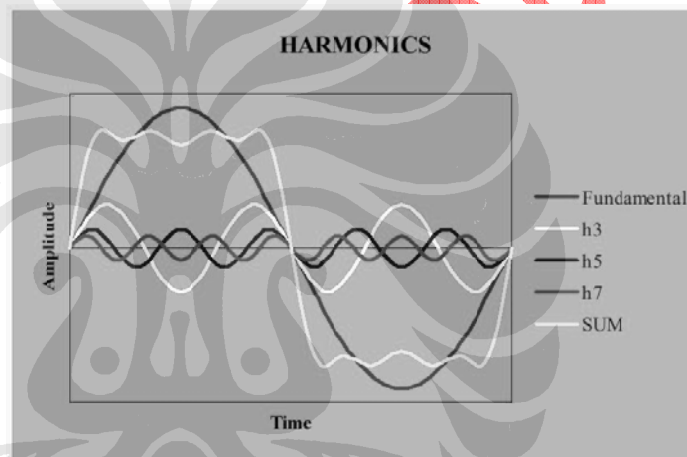
### 2.5.1.3. Harmonik Tegangan (Voltage Harmonic)

Harmonik Tegangan merupakan gelombang distorsi yang merusak bentuk gelombang fundamental (sinusoidal) tegangan, sehingga bentuk gelombang tegangan menjadi buruk (tidak sinusoidal murni). Harmonik tegangan ini dapat menyebabkan terjadinya pemanasan dan kualitas operasi yang buruk pada kinerja peralatan. Besarnya toleransi harmonik tegangan (THD-V) yang diperbolehkan adalah sebesar 3 %. Harmonik pada tegangan ini umumnya dipengaruhi oleh harmonik arus yang dihasilkan oleh beban/peralatan listrik.

### 2.5.2. Kualitas Arus

#### 2.5.2.1. Harmonik Arus (Current Harmonic)

Harmonik arus merupakan gelombang distorsi yang merusak bentuk gelombang fundamental (sinusoidal) Arus, sehingga bentuk gelombang arus menjadi tidak sinusoidal murni. Penyebab utama timbulnya Harmonik adalah peralatan yang bersifat **non-linier**, seperti komputer, peralatan elektronik, *robotics* (sistem kontrol), balast lampu elektronik, *variable speed drives*, *frequency inverters*, *UPS (Uninterruptable Power Supply)*, *DC drives*, *battery chargers*. Adanya harmonik arus ini akan menyebabkan beberapa kerugian pada operasi peralatan diantaranya overheating, operasi peralatan yang tidak reliable, netral overloading, penurunan lifetime peralatan dan peningkatan konsumsi kwh (arus) [3]. Gelombang akibat harmonik adalah seperti gambar dibawah ini :



Gambar 2.9. Gelombang Harmonik

### 2.5.3. Kualitas Daya

#### 2.5.3.1. Puncak Kebutuhan Daya (Peak Demand Load)

Daya puncak merupakan besar operasi beban maksimum, besarnya beban puncak menjadi referensi untuk menentukan besar langganan kapasitas kVA kepada produsen Listrik PLN. Penentuan Kapasitas kVA harus disesuaikan dengan besarnya beban puncak agar dicapai yang optimum antara usaha memenuhi kapasitas beban puncak dengan usaha untuk meminimumkan besar langganan kVA.

#### 2.5.3.2. Faktor Daya (Power Factor)

Faktor daya merupakan pergeseran fasa antara tegangan dan arus, didapat dari hasil perkalian bilangan kompleksnya. Faktor daya dapat bersifat leading dan lagging PF lead umumnya disebabkan oleh beban-beban yang bersifat kapasitif, sedangkan faktor daya bersifat lagging disebabkan oleh beban-beban yang bersifat induktif. Faktor daya yang rendah dapat menimbulkan efek-efek yang merugikan, seperti memperbesar rugi-rugi saluran, pemborosan kapasitas sistem (kVA), dan mengurangi efisiensi sistem (kW).

Perbaikan faktor daya dapat dilakukan dengan menerapkan kapasitor bank pada sistem peralatan yang disebut dengan PFCC (*Power Factor Correction Capacitor*), namun peralatan seperti ini dapat menimbulkan efek-efek yang merugikan, seperti :

- *Overvoltage*
- Rentan terhadap surja dan transien,
- Memperbesar Harmonik.
- Menimbulkan resonansi,  $X_c = X_l$ , dan pemanasan.
- Menyebabkan faktor daya menjadi lead pada kondisi beban rendah.
- Memperbesar torsi dan KW.

## **2.6. PENYUSUTAN ENERGI PADA JARINGAN DISTRIBUSI**

Rugi rugi atau biasa dikatakan sebagai susut energi merupakan fenomena yang umum terjadi dimana suatu sistem tidak mungkin memiliki efisiensi sebesar 100%. Artinya selalu ada bagian dari daya yang hilang ketika disalurkan, sehingga tidak seluruh daya yang dikirimkan dapat sampai kepada konsumen. Daya yang hilang dalam jumlah waktu tertentu dikatakan sebagai energi yang hilang. Penyusutan energi pada jaringan distribusi ini dapat dibagi menjadi beberapa bagian, antara lain :

1. Penyusutan energi pada penyulang
2. Penyusutan energi pada transformator distribusi
3. Penyusutan energi pada persambungan (jointing)

### 2.6.1. Penyusutan Energi Pada Penyulang

Penyulang merupakan bagian dari sistem distribusi yang berfungsi untuk menghubungkan antara Gardu Induk (GI) dengan gardu gardu distribusi yang tersebar diseluruh wilayah pelayanan. Penyulang sendiri dapat dipisahkan menjadi beberapa bagian, antara lain :

#### 2.6.1.1. Konduktor fasa

Pada bagian penyulang ini konduktor fasa merupakan bagian dari penyulang yang terbuat dari bahan logam. Umumnya bahan yang digunakan berupa aluminium atau tembaga. Karena terbuat dari bahan logam, maka konduktor yang dipakai memiliki nilai resistansi ( $R$ ) tertentu. Resistansi dari konduktor pada kabel merupakan bagian penting dari impedansi yang digunakan untuk studi kegagalan dan studi aliran daya. Resistansi memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap kapasitas arus yang dapat dibawa oleh kabel. Variabel umum yang mempengaruhi resistansi adalah suhu dari konduktor tersebut, dapat dikatakan bahwa resistansi meningkat seiring dengan peningkatan suhu sebagaimana dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$R_{t_2} = R_{t_1} \frac{M + t_2}{M + t_1} \quad (2.5)$$

Dimana

$R_{t_2}$  = Resistansi pada saat suhu  $t_2$ ,  $^{\circ}\text{C}$

$R_{t_1}$  = Resistansi pada saat suhu  $t_1$ ,  $^{\circ}\text{C}$

$M$  = Koefisien temperatur untuk material tertentu

= 228.1 untuk aluminium

= 234.5 untuk tembaga

Untuk jangkauan suhu yang luas, resistansi akan meningkat hampir linier terhadap suhu baik pada aluminium maupun pada tembaga. Efek dari suhu terhadap kenaikan resistansi dapat disederhanakan sebagai persamaan linier sebagai berikut:

$$R_{t_2} = R_{t_1} [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (2.6)$$

Dimana

$\alpha$  = koefisien temperature dari resistansi

- = 0.00404 untuk 61.2 % alumunium IACS pada suhu 20°C
- = 0.00347 untuk 6201-T81 alumunium *alloy* pada suhu 20°C
- = 0.00383 untuk tembaga *hard-drawn* pada suhu 20°C
- = 0.0036 untuk alumunium-*clad steel* pada suhu 20°C

Sehingga dari persamaan (2.5) dan (2.6) diatas di dapat hubungan bahwa  $\alpha = \frac{1}{M}$ .

Yang perlu diperhatikan dalam permasalahan ini adalah ketika jaringan transmisi masuk ke dalam GI, maka tegangan sistem akan diturunkan dari tegangan tinggi untuk transmisi (150 kV) menjadi tegangan menengah (20 kV) sehingga dengan besar daya yang sama, maka penurunan tegangan akan sejalan dengan kenaikan arus pada sistem. Arus yang besar pada konduktor dapat menimbulkan rugi rugi daya yang besar pada konduktor tersebut karena fungsi arus merupakan fungsi kuadrat pada persamaan daya yang hilang [8], sebagaimana dinyatakan pada persamaan berikut :

$$P_{losses} = I^2 R \quad (2.7)$$

Dimana

$P_{losses}$  = Daya yang hilang pada rangkaian, Watt

$I$  = Arus yang mengalir pada rangkaian, Ampere

$R$  = Hambatan pada rangkaian, Ohm

Arus dengan besar 4 ampere membuat daya yang hilang 16 kali lebih besar dibandingkan arus sebesar 1 ampere pada konduktor dengan hambatan yang sama. Sementara total energi yang hilang akibat terjadinya susut daya ini dapat diperhitungkan berdasarkan persamaan berikut :

$$W_{losses} = P_{losses} t \quad (2.8)$$

Dimana

$W_{losses}$  = Energi yang hilang, Joule

$P_{losses}$  = Daya yang hilang pada rangkaian, Watt

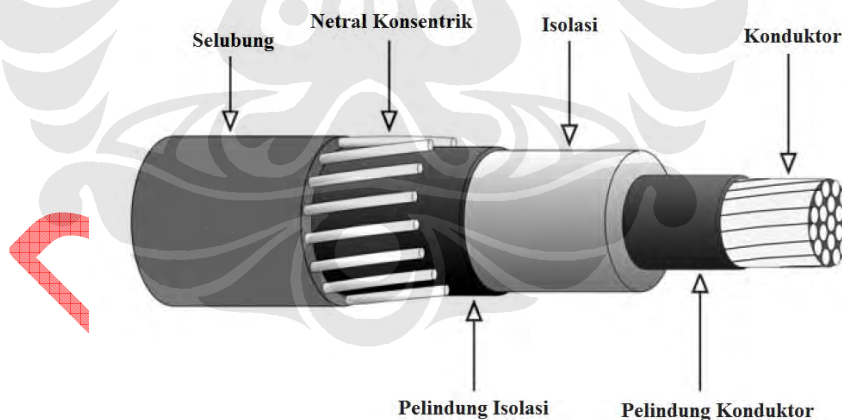
$t$  = Waktu, detik



### 2.6.1.2. Kabel Distribusi

Pada umumnya kabel yang digunakan untuk distribusi terdiri atas konduktor fasa, kemudian terdapat pelindung yang terbuat dari semikonduktor, isolasi kabel tersebut, pelindung isolator yang terbuat dari semikonduktor, kawat netral atau pelindung, dan pada akhirnya selubung penutup. Sebagian besar kabel distribusi merupakan kabel dengan konduktor tunggal. Terdapat dua jenis kabel, yaitu kabel dengan netral yang tersusun secara konsentrik dan kabel daya. Kabel dengan netral konsentrik umumnya memiliki konduktor yang terbuat dari alumunium, isolasi padat, dan netral yang tersusun secara konsentrik. Netral konsentrik terbuat dari beberapa kawat tembaga yang dililit mengitari isolasi [2].

Netral yang konsentrik merupakan netral yang sesungguhnya. Artinya kawat netral tersebut dapat membawa arus balik pada sistem pentanahan. Kabel distribusi bawah tanah untuk kawasan perumahan umumnya memiliki netral yang konsentrik. Kabel yang dilengkapi netral konsentrik juga digunakan untuk aplikasi saluran utama tiga fasa dan penyaluran daya tiga fasa untuk kebutuhan industri dan kebutuhan komersial lainnya [2].



**Gambar 2.10.** Gambar Penampang Kabel Distribusi

Sementara itu kabel daya memiliki konduktor fasa yang terbuat dari tembaga atau alumunium, isolasi padat, dan umumnya pita pelindung tipis yang terbuat dari tembaga. Untuk keperluan rangkaian distribusi, kabel daya digunakan untuk aplikasi penyulang saluran utama, penyulang rangkaian dan untuk aplikasi tiga fasa dengan arus besar lainnya. Selain dua jenis kabel utama tersebut, juga terdapat kabel untuk keperluan aplikasi dengan tegangan menengah, seperti kabel

daya dengan tiga konduktor fasa, kabel yang tahan terhadap api, kabel dengan fleksibilitas tinggi, dan kabel bawah laut.

Bagian yang perlu mendapat perhatian utama dari suatu kabel adalah isolasinya. Beberapa hal kunci yang perlu mendapat perhatian di dalam isolasi kabel adalah sebagai berikut :

a. Konstanta Dielektrik (atau permitivitas)

Faktor ini mempengaruhi kapasitas dari kabel. Konstanta dielektrik merupakan perbandingan dari kapasitansi dengan material isolasi terhadap kapasitansi dengan konfigurasi yang sama di ruang hampa. Kabel dengan kapasitansi yang lebih besar dapat menarik arus *charging* yang lebih besar.

b. Resistivitas Volume

Arus bocor yang melalui isolasi merupakan fungsi dari resistivitas isolasi terhadap arus searah (DC). Resistivitas isolasi menurun seiring dengan kenaikan suhu. Isolasi pada saat ini memiliki resistivitas yang sangat tinggi sehingga hanya sedikit sekali arus resistif yang dapat mengalir dari konduktor menuju isolasi.

c. Rugi Dielektrik

Seperti pada kapasitor, kabel memiliki rugi dielektrik. Kerugian ini diakibatkan oleh pergerakan dipol dipol di dalam polimer atau sebagai akibat dari pergerakan muatan pembawa di dalam isolasi. Rugi dielektrik memiliki kontribusi terhadap arus resistif bocor pada kabel. Rugi rugi dielektrik akan meningkat seiring dengan frekuensi, temperatur, dan tegangan pengoperasian.

d. Faktor Disipasi (loss angle, loss tangent,  $\tan \delta$ , dan pendekatan nilai PF )

Faktor disipasi merupakan perbandingan dari arus resistif yang muncul oleh kabel terhadap arus kapasitif yang muncul ( $I_R/I_X$ ). Karena arus bocor umumnya kecil, maka faktor disipasi dapat digunakan sebagai pendekatan nilai faktor daya, sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan berikut :

$$pf = I_R / |I| = I_R / \sqrt{I_R^2 + I_X^2} \approx I_R / I_X = \text{faktordisipasi} \quad (2.9)$$

Beberapa faktor kunci untuk kabel dengan isolasi yang berbeda beda ditunjukkan oleh tabel berikut :

	Konstanta Dielektrik 20°C	LossAngle Tan δ 20°C	Resistansi Volume 20°C	Rugi Dielektrik tahunan W/1000 ft	Kekuatan Impuls V/mil	Penyerapan air ppm
PILC	3.6	0.003	10 <sup>11</sup>	N / A	1000-2000	25
PE	2.3	0.0002	10 <sup>14</sup>	N / A		100
XLPE	2.3	0.0003	10 <sup>14</sup>	8	3300	350
TR-XLPE	2.4	0.001	10 <sup>14</sup>	10	3000	<300
EPR	2.7-3.3	0.005-0.008	10 <sup>13</sup> -10 <sup>14</sup>	28-599	1200-2000	1150-3200

Tabel 2.2. Tabel Faktor Kunci Isolasi pada Berbagai Macam Kabel

Pada kabel, nilai kapasitansi yang muncul lebih signifikan dibandingkan nilai kapasitansi pada kawat saluran udara. Nilai kapasitansi dari kabel dengan konduktor tunggal ditunjukkan oleh persamaan berikut ini :

$$C = \frac{0.00736\epsilon}{\log_{10}\left(\frac{D}{d}\right)} \quad (2.10)$$

Dimana

C = Kapasitansi, µF/1000 ft

0.00736 = Konstanta dielektrik ruang hampa(ε<sub>0</sub>)

ε = Konstanta dielektrik bahan (2.3 untuk XLPE, 3 untuk EPR)

d = diameter bagian dalam dari isolasi

D = Diameter bagian luar dari isolasi

Pengaruh dari adanya nilai kapasitansi dari kabel akan menimbulkan daya reaktif pada sistem, sebagaimana dijelaskan dalam persamaan berikut ini :

$$Q_{var} = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot V_{LG,kV}^2 \quad (2.11)$$

Dimana

Q<sub>var</sub> = var/ 1000ft/ fasa

f = frekuensi dari sistem, Hz

C = kapasitansi, µF/ 1000 ft

V<sub>LG,kV</sub> = tegangan saluran ke tanah, kV

Pada kabel untuk distribusi terdapat nilai hambatan yang muncul selain hambatan resistif yang berasal dari konduktor fasanya. Nilai hambatan yang lain ini akan menentukan impedansi total dari kabel yang digunakan. Yang mempengaruhi nilai impedansi total tersebut adalah nilai reaktansi yang berasal dari rangkaian yang bersifat induktif dan bagian rangkaian yang bersifat kapasitif.

Nilai reaktansi proporsional terhadap induktansi dari rangkaian dan induktansi akan menyebabkan tegangan yang berlawanan dengan perubahan aliran arus. Arus bolak balik (AC) selalu berubah, sehingga nilai reaktansi akan selalu menciptakan tegangan sebagai akibat dari aliran arus. Jarak antar konduktor akan menentukan komponen eksternal dari nilai reaktansi tersebut. Nilai induktansi berdasarkan oleh wilayah yang dipengaruhi oleh lingkaran arus, sehingga wilayah yang lebih besar (jarak antar konduktor yang lebih lebar) akan menimbulkan nilai induktansi yang besar juga. Pada kawat saluran udara, nilai reaktansi induktif terutama berdasarkan jarak pemisahan antar konduktor dan bukan ukuran dari konduktor tersebut, bukan pula jenis logam yang digunakan untuk konduktor tersebut, serta bukan kemampuan regang dari konduktor tersebut [2]. Nilai reaktansi antara dua konduktor yang paralel dalam ohm per mil adalah sebagai berikut :

$$X_{ab} = 0.2794 \frac{f}{60} \log_{10} \frac{d_{ab}}{GMR} \quad (2.12)$$

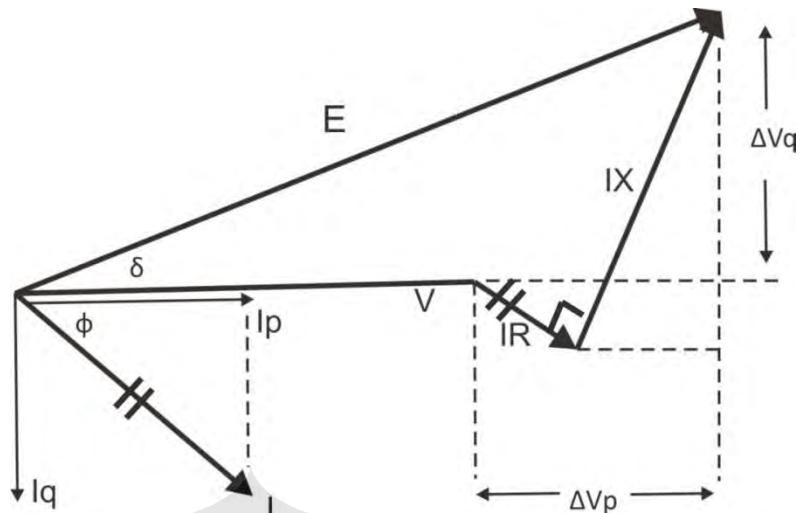
Dimana

$f$  = frekuensi, Hz

$d_{ab}$  = Jarak diantara konduktor, feet

$GMR$  = jari jari rata rata secara geometris dari kedua konduktor, feet

Dengan adanya reaktansi pada jaringan maka dapat timbul daya reaktif. Daya reaktif dapat menimbulkan jatuh tegangan pada sisi penerima [5]. Sebagaimana diperlihatkan pada **gambar 2.11**.



**Gambar 2.11.** Diagram Fasa yang Menunjukkan Jatuh Tegangan Akibat Daya Reaktif

Dari gambar tersebut, maka terlihat bahwa dengan adanya daya reaktif akan menyebabkan terjadinya jatuh tegangan di sisi penerima. Hubungan antara daya reaktif dengan jatuh tegangan ditunjukkan oleh persamaan berikut ini :

$$E^2 = (V + \Delta V_p)^2 + \Delta V_q^2 \quad (2.13)$$

$$= (V + RI \cos\phi + XI \sin\delta)^2 + (XI \cos\phi - RI \sin\phi)^2$$

$$E^2 = \left(V + \frac{RP}{V} + \frac{XQ}{V}\right)^2 + \left(\frac{XP}{V} - \frac{RQ}{V}\right)^2 \quad (2.14)$$

Adanya jatuh tegangan di sisi penerima merupakan indikator adanya susut energi pada jaringan [3]. Karena untuk beban dengan kebutuhan suplai daya yang tetap, seperti pada motor industri, penurunan tegangan akan menyebabkan terjadinya peningkatan arus. Sedangkan telah dibahas diawal bahwa dengan adanya arus yang besar, maka rugi rugi saluran akibat arus ( $I^2R$ ) juga akan semakin besar, sehingga energi yang hilang pada jangka waktu tertentu juga akan besar. Hubungan antara tegangan dengan arus pada beban yang membutuhkan suplai daya tetap dituliskan dalam persamaan berikut :

$$P = VI \cos\theta \quad (2.15)$$

Dimana

P = daya yang dibutuhkan oleh motor motor (besarnya tetap)

V = tegangan operasi, Volt

$i$  = arus pada rangkaian, Ampere

$\cos \theta$  = faktor daya

ketika daya yang dibutuhkan konstan, maka penurunan tegangan akan diikuti dengan kenaikan arus.

### 2.6.2 Penyusutan Energi Pada Transformator Distribusi

Transformator merupakan komponen dalam jaringan tenaga listrik yang berfungsi untuk mengubah tenaga listrik dari suatu tingkat tegangan ke suatu tingkat tegangan lainnya [4]. Sebuah transformator terdiri atas dua pasang kumparan yang terhubung oleh medan magnetik. Medan magnetik akan menghantarkan seluruh energi (kecuali pada autotransformator). Pada transformator yang ideal, tegangan pada sisi masukan dan keluaran berhubungan dengan perbandingan lilitan dari transformator tersebut, sebagaimana dapat dituliskan dalam persamaan berikut :

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 \quad (2.16)$$

Dimana  $N_1$  dan  $N_2$  merupakan jumlah lilitan dan  $V_1$  dan  $V_2$  adalah tegangan pada kumparan 1 dan kumparan 2. Pada transformator yang sesungguhnya, tidak semua fluks berada diantara dua kumparan tersebut dapat disalurkan. Fluks yang bocor tersebut akan menyebabkan terjadinya jatuh tegangan diantara kumparan primer dan kumparan sekunder, sehingga besarnya tegangan akan lebih akurat ditunjukkan oleh persamaan berikut :

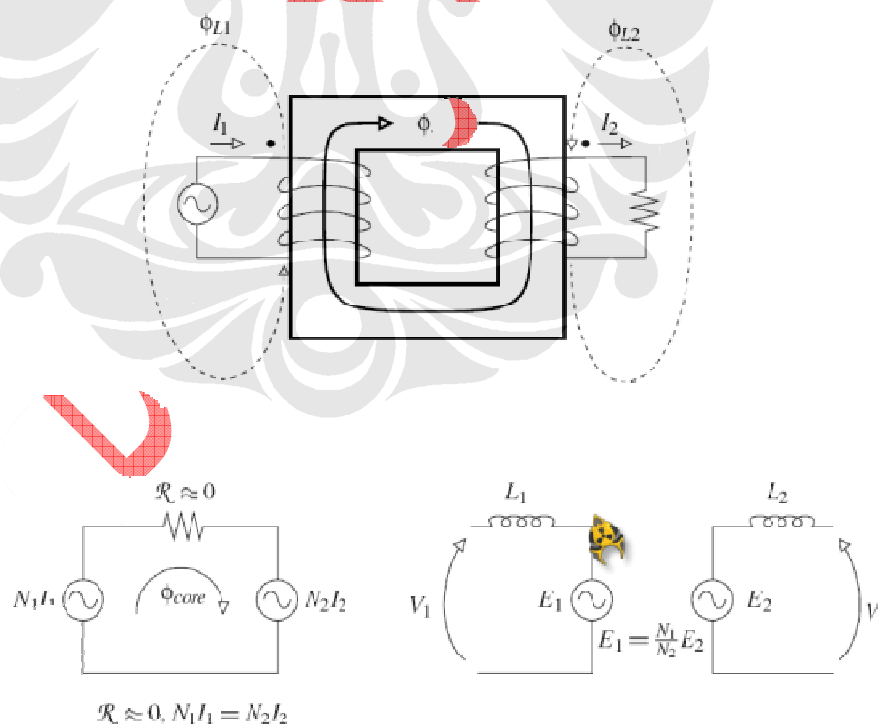
$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 - X_L I_1 \quad (2.17)$$

Dimana  $X_L$  merupakan reaktansi bocor dalam satuan ohm yang dilihat dari sisi kumparan primer, dan  $I_1$  merupakan arus yang keluar dari kumparan primer. Arus pada transformator juga dipengaruhi oleh jumlah lilitan yang ada pada transformator tersebut, seperti pada persamaan berikut :

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \text{ atau } N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (2.18)$$

Transformator memiliki inti yang bersifat magnetik yang berfungsi untuk membawa medan magnetik yang besar. Baja yang dipergunakan sebagai inti di dalam transformator memiliki permeabilitas lebih dari 1000 kali dari permeabilitas udara [2]. Apabila pada sisi primer (sisi sumber, sisi tegangan tinggi) diberikan suatu nilai tegangan tertentu dan pada sisi sekunder (sisi beban,

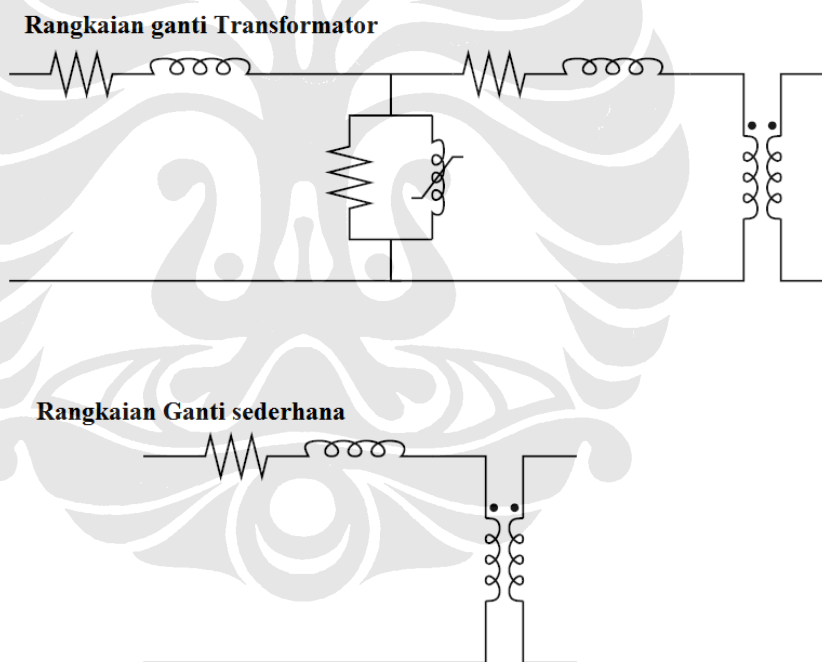
sisi tegangan rendah) tidak ada beban yang terpasang. Maka kumparan akan menarik arus eksitasi dari sistem yang menimbulkan medan magnetik sinusoidal di inti transformator. Fluks yang muncul pada lilitan akan menyebabkan ggl balik pada kumparan yang akan membatasi arus yang masuk ke dalam transformator. Transformator tanpa beban (no load) pada sisi sekundernya akan menarik arus yang kecil sekali (hanya berupa arus eksitasi) yang besarnya sekitar 0.5 % dari total arus yang mengalir pada transformator pada saat berbeban penuh [2]. Pada sisi sekunder yang tidak berbeban, maka fluks sinusoidal akan menciptakan tegangan rangkaian terbuka (open-circuit voltage) yang nilainya sama dengan nilai tegangan pada sisi primer dikalikan dengan perbandingan jumlah lilitan. Ketika kita tambahkan beban pada sisi sekunder dari transformator, maka beban akan menarik arus melalui kumparan sekunder. Umumnya pada rangkaian yang bersifat induktif, arus yang semakin besar akan menciptakan fluks yang lebih banyak, tetapi tidak pada transformator. Peningkatan gaya pada arus pada satu kumparan akan berlawanan dengan penurunan gaya dari arus yang mengalir pada kumparan yang lainnya sebagaimana ditunjukkan oleh **gambar 2.9**.



**Gambar 2.12.** Diagram Fluks yang dibangkitkan pada Transformator

Fluks pada bagian inti transformator yang sedang dibebani besarnya sama dengan fluks pada bagian inti transformator yang tidak dibebani, walaupun arus pada transformator yang sedang dibebani lebih besar. Tegangan pada kumparan primer akan menentukan jumlah fluks pada transformator. Sementara fluks pada bagian inti menentukan tegangan pada sisi keluaran dari transformator.

**Gambar 2.13** menunjukkan model dengan nilai impedansi tertentu pada sebuah transformator. Model yang mendetail menunjukkan serangkaian impedansi yang terdiri atas resistansi dan reaktansi. Serangkaian resistansi pada transformator sebagian besar merupakan resistansi kawat pada setiap kumparan. Sementara nilai reaktansi menunjukkan adanya impedansi bocor. Percabangan *shunt* merupakan cabang termagnetisasi, arus yang mengalir akan membuat inti pada transformator menjadi bersifat magnetik [4].



**Gambar 2.13.** Gambar Rangkaian Ganti Transformator

Sebagian besar arus magnetisasi merupakan daya reaktif, tetapi tetap memiliki unsur daya real. Daya pada transformator dapat mengalami penyusutan pada bagian inti transformator melalui beberapa hal, antara lain:



## 1. Histerisis

Karena dipol dipol magnet berubah arah, maka terjadi peningkatan panas pada inti transformator sebagai akibat adanya tumbukan antar dipol dipol magnetik tersebut. Rugi histerisis merupakan fungsi dari volume inti, frekuensi, dan kepadatan fluks maksimum sebagaimana dituliskan pada persamaan berikut :

$$P_h \propto V_e f B^{1.6} \quad (2.19)$$

Dimana

- $V_e$  = volume dari inti
- $f$  = frekuensi
- $B$  = kepadatan fluks maksimum

## 2. Arus Eddy

Arus Eddy pada bahan penyusun inti transformator akan menyebabkan rugi rugi resistif ( $I^2R$ ). Fluks dari inti akan menginduksi arus eddy sehingga menyebabkan terjadinya perubahan kerapatan fluks pada transformator. Rugi arus Eddy merupakan fungsi dari volume inti, frekuensi, dan kepadatan fluks, ketebalan lempeng, resistivitas dari material penyusun inti sebagaimana dituliskan dalam persamaan berikut :

$$P_e \propto V_e B^2 f^2 t^2 / r \quad (2.20)$$

Dimana

- $t$  = ketebalan lempeng
- $r$  = resistivitas dari material inti

Inti yang terbuat dari logam *amorphous* akan secara signifikan mengurangi susut pada bagian inti, kurang lebih menjadi ¼ dari susut yang terjadi pada inti yang terbuat dari bahan baja-silikon, antara 0.005 % sampai 0.01 % dari rating transformator [2]. Inti dari bahan *amorphous* memiliki rugi histerisis yang rendah. Rugi arus Eddy juga sangat rendah karena material memiliki resistivitas yang tinggi dan ketebalan lempeng yang sangat tipis (ketebalannya mencapai 1 mm). Transformator dengan inti yang terbuat dari logam *amorphous* akan memiliki ukuran yang lebih besar daripada transformator biasa pada rating yang

sama dan memiliki biaya pengadaan yang lebih tinggi. Rugi pada saat transformator dibebani, rugi ada saat transformator tanpa beban, dan harga semuanya memiliki hubungan. Ketika kita ingin mengurangi rugi rugi saat transformator berbeban maka akan meningkatkan rugi saat transformator tidak berbeban dan begitu pula kebalikannya. **Tabel 2.3** menunjukkan hubungan tersebut.

	No Load Losses	Load Losses	Biaya
<b>Untuk menurunkan no load losses</b>			
Menggunakan material dengan rugi lebih rendah	Lebih rendah	Tidak berubah	Lebih tinggi
Mengurangi kepadatan fluks dengan cara :			
1) Memperbesar CSA (cross-section area)	Lebih rendah	Lebih tinggi	Lebih tinggi
2) Menurunkan tegangan/jumlah lilitan	Lebih rendah	Lebih tinggi	Lebih tinggi
<b>Untuk menurunkan no load losses</b>			
Menggunakan material konduktor yang memiliki rugi rugi rendah	Tidak berubah	Lebih rendah	Lebih tinggi
Mengurangi kepadatan arus dengan cara memperbesar CSA (cross-section area)	Lebih tinggi	Lebih rendah	Lebih tinggi
Mengurangi panjang daerah yang dilewati arus dengan cara :			
1) Mengurangi CSA inti	Lebih tinggi	Lebih rendah	Lebih rendah
2) Meningkatkan tegangan / jumlah lilitan			

**Tabel 2.3.** Tabel Hubungan antara Material Penyusun Transformator dengan Rugi Ruginya

Sehingga pada transformator jumlah penyusutan total yang terjadi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$L_{total} = P^2 F_{ls} L_{load} + L_{no-load} \quad (2.21)$$

Dimana

- $L_{total}$  = susut rata rata, kW
- $P$  = beban puncak transformator, per unit
- $F_{ls}$  = faktor susut, per unit
- $L_{no-load}$  = susut tanpa beban, kW
- $L_{load}$  = susut berbeban, kW

### 2.6.3 Penyusutan Energi Pada Sambungan (Jointing)

Persambungan merupakan salah satu hal yang penting dalam suatu sistem tenaga listrik ataupun peralatan listrik. Sambungan ini sedikit banyak menentukan keefisienan sistem atau peralatan listrik tersebut [3]. Kontaktor seperti saklar dan rele merupakan peralatan yang harus dapat mengalirkan arus dengan baik apabila dalam kondisi rangkaian tertutup. Dalam kondisi ideal, arus akan mengalir pada rangkaian tertutup dan akan langsung terputus apabila rangkaian terbuka. Pada kenyataannya, kondisi ideal merupakan hal yang mustahil untuk dicapai. Banyak faktor-faktor lain yang menyebabkan kondisi di lapangan berbeda dengan teori yang ada. Busur listrik (arcing) merupakan fenomena yang muncul pada persambungan. Busur listrik memiliki beberapa efek negatif yang harus diperhatikan seperti munculnya interferensi elektromagnetik, merusak permukaan kontak pada saklar, panas yang dihasilkan dapat menyebabkan permukaan kontak meleleh, dan yang paling berbahaya ialah dapat mencederai atau menyebabkan kematian pada manusia akibat kontak fisik secara langsung [6].

Busur listrik merupakan fenomena dimana arus bisa melewati celah antara permukaan elektrik seperti dua permukaan kontak pada konektor terpisah. Busur listrik dapat muncul pada kontak yang tertutup, yaitu ketika kedua permukaan saling mendekati sebelum keduanya benar-benar bersentuhan. Busur listrik juga bisa muncul pada kontak yang terbuka, yaitu pada saat permukaan kontak terpisah antara satu dengan yang lain.

Konektor elektrik atau saklar harus dapat melewatkan arus antara kedua permukaan kontak apabila dalam posisi tertutup. Hal ini menandakan adanya tegangan pada permukaan kontak. Apabila konektor tidak terhubung, atau saklar dalam posisi terbuka, arus akan berhenti mengalir tetapi tegangannya akan tetap ada. Tegangan ini baru akan hilang apabila sumber tegangannya diputus. Pada keadaan yang tepat, tegangan ini akan menyebabkan munculnya busur pada celah antara kedua permukaan kontak.

Busur dapat muncul baik pada permukaan kontak yang terbuka maupun yang tertutup. Dalam kondisi tertutup, tegangan minimum busur turun sebagaimana kedua permukaan kontak saling mendekati. Apabila sumber tegangan terlalu rendah, tidak akan terbentuk busur dan arus hanya akan mulai mengalir apabila kedua permukaan saling bersentuhan. Dengan sumber tegangan yang cukup, busur penutupan akan muncul dimana tegangan minimum busur turun sampai di bawah tegangan sumber.

Busur penutupan diawali dengan elektron meninggalkan katoda dan berpindah melewati celah kontak menuju anoda. Selama perjalanan, elektron akan bertabrakan dengan molekul ionisasi gas di udara. Cahaya yang muncul dari busur berasal dari energi molekul gas. Elektron akan menuju anoda dan memanaskannya sehingga dapat melepaskan ion-ion positif ke celah tersebut. Ion-ion positif ini bersamaan dengan campuran gas yang terjadi juga akan terbombardir dan memanaskan katoda. Pemanasan ini bisa menguapkan bagian dari katode atau katoda. Elektron, ion metal, ion gas dan metal yang menguap semua membentuk kolom busur [7].

Busur listrik juga dapat muncul bila kedua permukaan kontak terpisah yang menyebabkan terputusnya arus pada rangkaian. Hal ini terjadi bila arus dan tegangan beban yang besar terganggu sebagaimana sering ditemukan pada saklar atau rele. Busur terbuka dapat terjadi dengan cara yang berbeda. Ada nilai yang pasti dari resistansi elektrik sebagaimana arus ditekan melewati jalur yang kecil melewati permukaan. Dengan permukaan kontak yang mulai terpisah, tekanan berkurang baik dari jumlah maupun ukurannya. Ini mendorong nilai arus yang semakin besar yang melewati sisa jalurnya dan resistansi elektrik bertambah.

Sementara nilai resistansi yang besar akan menyebabkan penyusutan energi karena rugi saluran resistif juga akan semakin besar.



# BAB III

## PEMILIHAN OBJEK

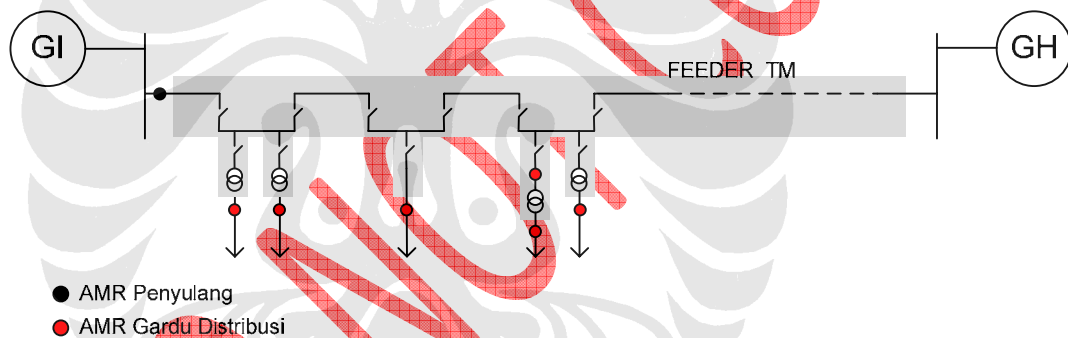
### DAN METODE PENGAMBILAN DATA

#### 3.1. SUSUT TEKNIS JARINGAN DISTRIBUSI

##### 3.1.1. Susut Jaringan Tegangan Menengah (JTM)

Susut penyulang jaringan tegangan menengah dapat ditentukan berdasarkan pengukuran AMR yaitu selisih energi (kWh) yang dikirimkan penyulang dan jumlah energi yang terukur pada masing-masing gardu distribusi.

$$\text{Susut JTM} = \sum kWh_{\text{penyulang}} - \sum kWh_{\text{Gardu Distribusi}} \quad (3.1)$$



**Gambar 3.1** Letak AMR untuk pengukuran susut pada jaringan tegangan menengah (JTM)

Pada suatu jaringan tegangan menengah (JTM), faktor-faktor yang mempengaruhi susut antara lain impedansi komponen-komponen sistem, kondisi jointing, harmonik, suhu, sirkulasi udara gardu, korona, dsb.

Untuk studi susut pada JTM ini, diambil dua penyulang yang dijadikan objek studi. Penyulang yang dipilih sebagai objek studi susut adalah penyulang Sotong dari Gardu Induk (GI) Muara Karang dan penyulang Anggrek dari GI Angke. Berikut ini akan dipaparkan mengenai karakteristik kedua penyulang tersebut berdasarkan data dan hasil verifikasi di lapangan.

### 3.1.1.1 Penyulang Sotong

Penyulang Sotong merupakan penyulang tegangan menengah dengan tegangan operasi 20 kV. Penyulang ini mendapat pasokan dari trafo 1 GI Muara Karang. Penyulang Sotong terdiri dari 21 Gardu Distribusi (GD) dengan panjang kabel penyulang dari GI sampai ke GD terakhir adalah 11.714,44 m. Pelanggan yang dilayani oleh penyulang ini terdiri dari pelanggan tegangan rendah (TR) dan tegangan menengah (TM). Karakteristik penyulang Sotong dapat dilihat pada **tabel 3.1**.

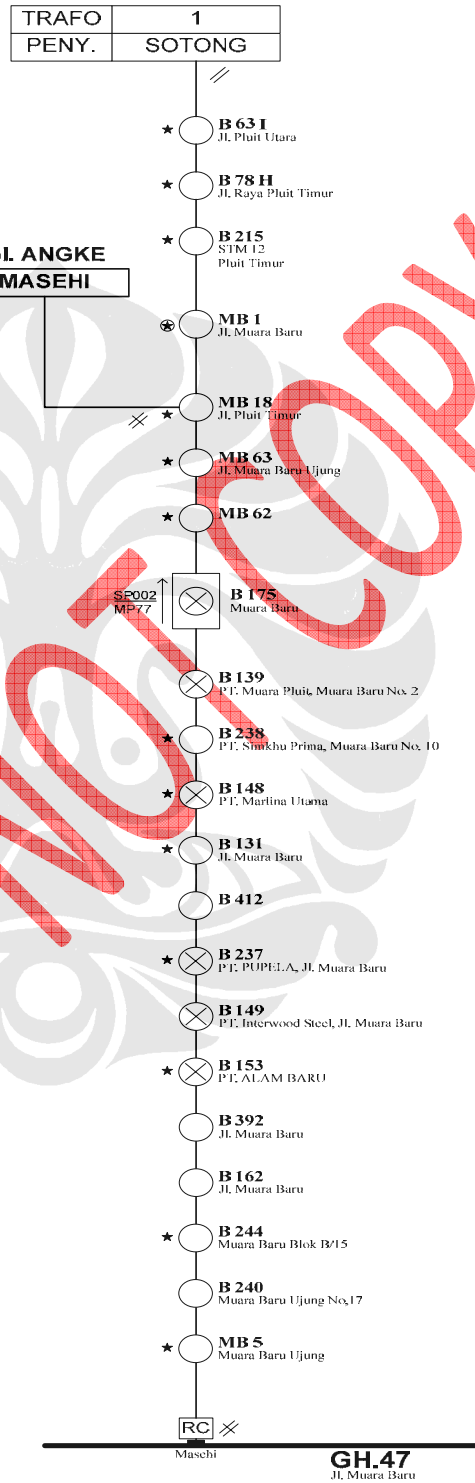
No	Dari	Ke	Panjang (M)	Kapasitas Trafo Terpasang (kVA)	Jenis Penampang	Keterangan
1	GI M. KARANG	B 63I	1,997.00	630	XLPE 3x300 mm <sup>2</sup>	200 m dr GI
2	B 63I	B 78H	377.00	630	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
3	B 78H	B 215	364.65	400	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
4	B 215	MB 1	277.06	630	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
5	MB 1	MB 18	450.09	630	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
6	MB 18	MB 63	1,839.05		XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	PLG TM
7	MB 63	MB 62	146.47	400	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
8	MB 62	B 175	727.65	1030	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
9	B 175	B 139	210.04		XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	PLG TM
10	B 139	B 238	761.49	1030	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
11	B 238	B 148	862.97	630	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
12	B 148	B 131	1235.40	630	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
13	B 131	B 412	301.48	315	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
14	B 412	B 237	67.29	1030	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
15	B 237	B 149	323.06		XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	PLG TM
16	B 149	B 153	651.58	1260	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
17	B 153	B 392	234.18	400	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
18	B 392	B 162	184.66	400	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
19	B 162	B 244	250.15	400	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
20	B 244	B 240	248.32	400	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
21	B 240	MB 5	204.85	630	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	TM
	MB 5	MASEHI	527.86		XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	sd jointing
	GH 47	MASEHI	6.77		XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	

**Tabel 3.1** Data Karakteristik Penyulang Sotong

Sementara **gambar 3.1** menunjukkan diagram satu garis penyulang Sotong. Dari gambar 3.1, diketahui bahwa penyulang Sotong juga terhubung dengan penyulang Masehi dari GI Angke pada GD MB18. Dalam kondisi operasi normal, pasokan penyulang Sotong tetap diperoleh dari trafo 1 GI Muara Karang

dan kubikel yang menghubungkan penyulang Sotong dan penyulang Masehi pada GD MB18 selalu dalam keadaan terbuka (*normally open*).

### GI. MUARA KARANG



Gambar 3.2 Diagram Satu Garis Penyulang Sotong



### 3.1.1.2. Penyulang Anggrek

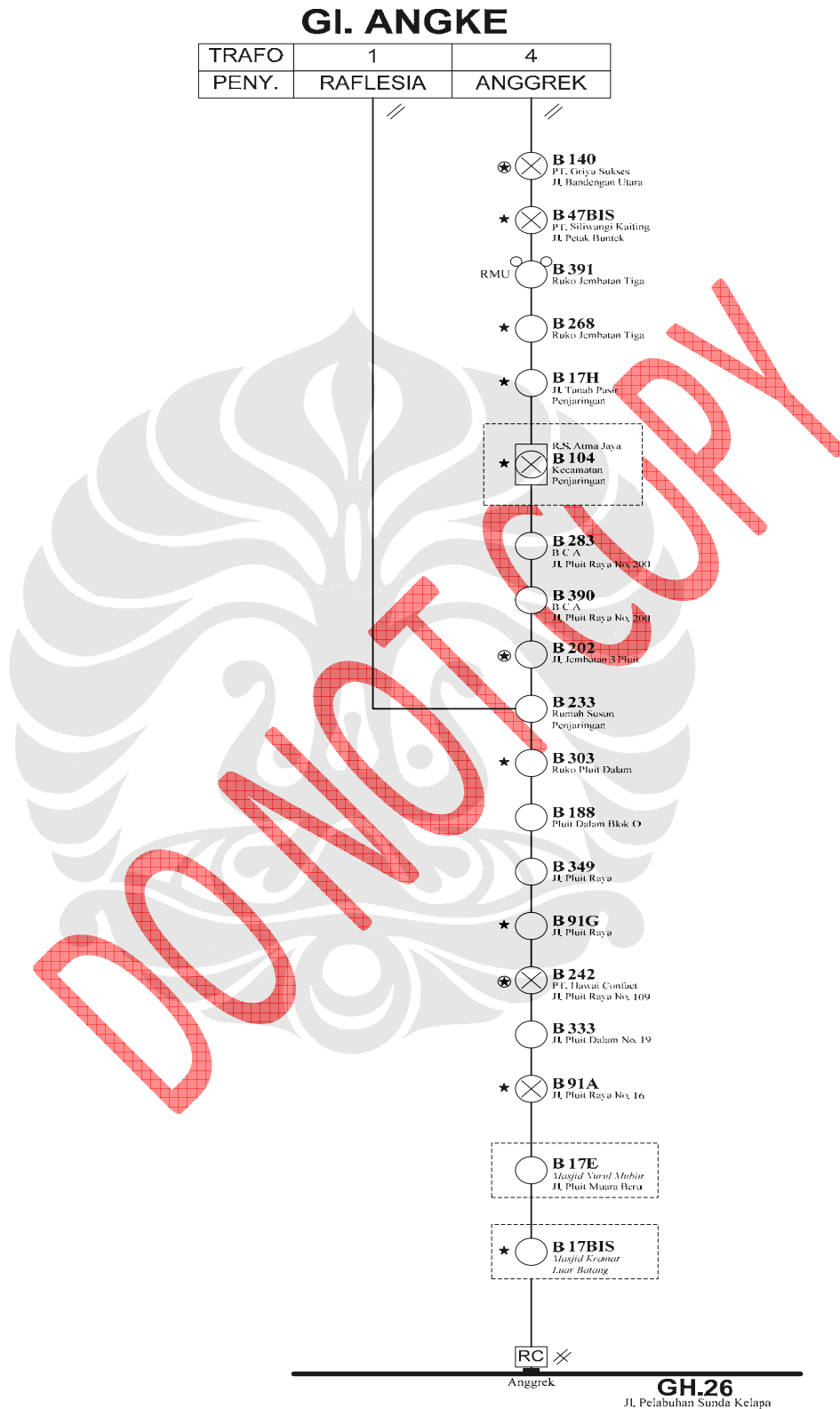
Penyulang Anggrek merupakan penyulang tegangan menengah dengan tegangan operasi 20 kV. Penyulang ini mendapat pasokan dari trafo 4 GI Angke. Penyulang Anggrek terdiri dari 19 Gardu Distribusi (GD) dengan panjang kabel penyulang dari GI sampai ke GD terakhir adalah 10,693.70 m. Pelanggan yang dilayani oleh penyulang ini terdiri dari pelanggan tegangan rendah (TR) dan tegangan menengah (TM). Karakteristik penyulang Sotong dapat dilihat pada tabel 3.2.

No	Dari	Ke	Panjang (M)	Kapasitas Trafo Terpasang (kVA)	Jenis Penampang	Keterangan
1	GI ANGKE	B 140	383.54	400	XLPE 3x300 mm <sup>2</sup>	200 m dr GI
2	B 140	B 47BIS	160.61	630	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
3	B 47 BIS	B 391	737.65	630	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
4	B 391	B 268	365.36	1260	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
5	B 268	B 17H	208.53	2000	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
6	B 17H	B 104	863.78	1260	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
7	B 104	B 283	447.53		XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	PLG TM
8	B 283	B 390	50.28	400	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
9	B 390	B 202	450.00	1260	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
10	B 202	B 233	375.38	1000	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
11	B 233	B 303	308.70	630	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
12	B 303	B 188	98.74	630	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
13	B 188	B 349	449.15		XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	PLG TM
14	B 349	B 91G	668.76	630	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
15	B 91G	B 242	1,171.99	630	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
16	B 242	B 333	3,080.56	630	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
17	B 333	B 91A	82.02	630	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
18	B 91A	B 17E	316.43	630	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	
19	B 17E	B 17BIS	474.70	630	XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	TM
	B 17BIS	ANGGREK	1,665.85		XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	sd jointing
	GH 26	ANGGREK	8.80		XLPE 3x240 mm <sup>2</sup>	

**Tabel 3.2** Data Karakteristik Penyulang Anggrek

Dari **gambar 3.2**, diketahui bahwa penyulang Anggrek juga terhubung dengan penyulang Raflesia dari Trafo 1 GI Angke pada GD B233. Dalam kondisi operasi normal, pasokan penyulang Anggrek tetap diperoleh dari trafo 4 GI Angke

dan kubikel yang menghubungkan penyulang Anggrek dan penyulang Raflesia pada GD B233 selalu dalam keadaan terbuka (*normally open*).

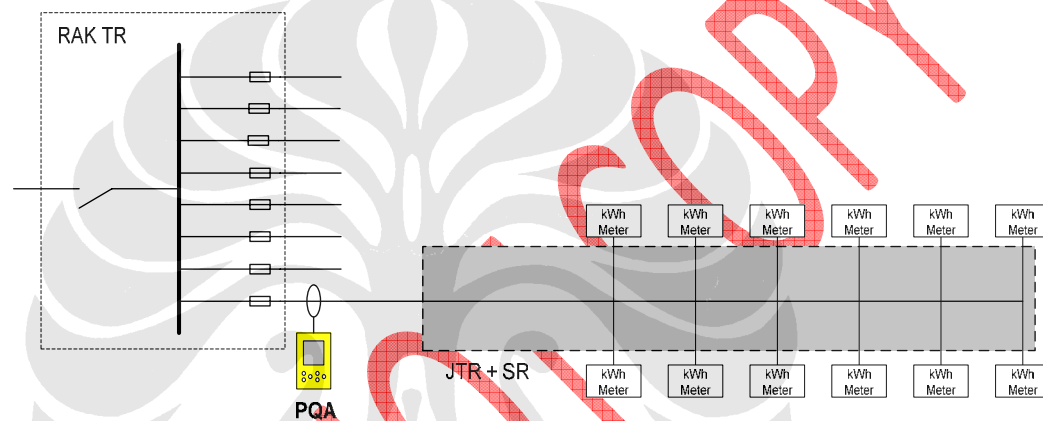


Gambar 3.3 Diagram Satu Garis Penyulang Anggrek

### 3.1.2. Susut Jaringan Tegangan Rendah (JTR)

Susut jaringan tegangan rendah dapat ditentukan berdasarkan pengukuran energi pada outgoing rak TR menggunakan Power Quality Analyzer (PQA) dan energi yang tercatat pada kWh Meter pelanggan. Susut jaringan tegangan rendah yaitu selisih energi (kWh) yang dikirimkan dari gardu distribusi dan jumlah energi yang tercatat di semua kWh Meter pada jurusan yang terkait.

$$\text{Susut JTR} = \sum kWh_{PQA} - \sum kWh_{kWh \text{ Meter Pelanggan}} \quad (3.2)$$



**Gambar 3.4** Letak Alat Ukur untuk pengukuran susut jaringan tegangan rendah (JTR)

Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya susut pada jaringan tegangan rendah antara lain adalah impedansi kabel JTR, panjang kabel JTR, jointing, sambungan tak resmi, kondisi kWh meter, dsb.

Studi susut pada jaringan tegangan rendah (JTR) dilakukan dengan mengambil objek studi JTR dari gardu distribusi (GD) yang telah dipilih yaitu GD B233. JTR yang dipilih dari GD B233 adalah jurusan 8. Pelanggan-pelanggan JTR tersebut adalah pelanggan-pelanggan dalam kompleks rumah susun tanah pasir, Berikut ini adalah peta JTR yang dipilih dan lokasi pelanggan yang dilayaninya.



**Gambar 3.5** Peta Jaringan Tegangan Rendah (JTR) pada Gardu B 233

JTR jurusan 8 dari GD B233 memiliki karakteristik sebagai berikut. Panjang kabel JTR total jurusan 8 dari outgoing rak TR hingga ke panel hubung bagi di ruang kWh meter adalah sekitar 166,15 meter. Jumlah pelanggan pada jurusan 8 ini adalah 102 pelanggan yang terdiri dari 101 pelanggan satu fasa dan satu pelanggan 3 fasa. Lokasi pelanggan-pelanggan jurusan 8 ini adalah daerah yang diarsir berwarna merah pada **gambar 3.5**.

### 3.1.3. Susut Gardu Distribusi

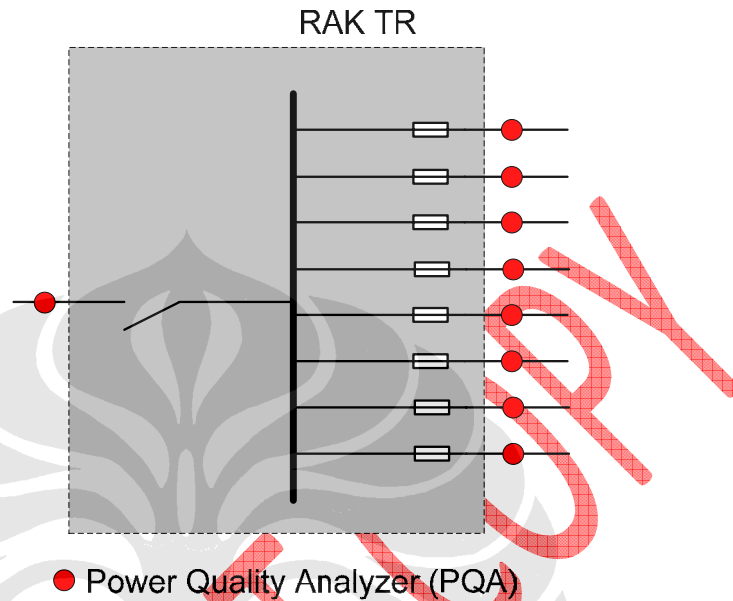
Susut gardu distribusi terdiri dari dua bagian yaitu susut rak TR dan susut transformator. Susut total gardu distribusi adalah jumlah susut pada rak TR dan susut transformator.

$$\text{Susut GD} = \text{Susut Rak TR} + \text{Susut Transformator} \quad (3.2)$$

Susut rak TR dapat ditentukan berdasarkan hasil pengukuran menggunakan Power Quality Analyzer (PQA) yang dipasang pada incoming rak TR dan semua

outgoing rak TR. Besarnya susut rak TR adalah selisih energi yang terukur pada incoming rak TR dengan energi total yang terukur pada semua outgoing rak TR.

$$\text{Susut Rak TR} = \sum kWh_{\text{incoming rak TR}} - \sum kWh_{\text{outgoing rak TR}} \quad (3.3)$$



**Gambar 3.6** Letak PQA pada Rak TR untuk pengukuran susut Rak TR

Untuk mengetahui susut rak TR di gardu distribusi dalam studi susut ini, diambil gardu distribusi (GD) sebagai sampel untuk dilakukan pengukuran secara monitoring menggunakan alat ukur Power Quality Analyzer (PQA). Gardu distribusi yang dipilih sebagai cuplik adalah gardu distribusi B233 yang tergabung dalam penyulang Anggrek dan berlokasi di kompleks rumah susun tanah pasir, Penjaringan, Jakarta Utara. Peta lokasi GD B233 dapat dilihat pada gambar berikut :

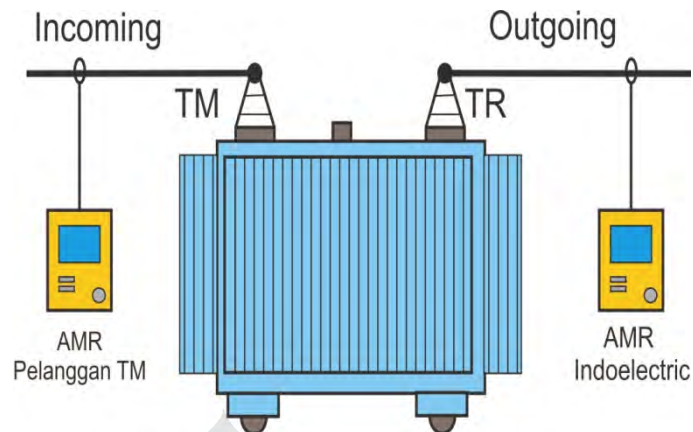


**Gambar 3.7** Peta Lokasi Gardu Distribusi B233

Pada rak TR, faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya susut antara lain kondisi jointing, suhu, kondisi fuse, dsb. Sedangkan pada transformator distribusi, faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya susut adalah impedansi trafo, kualitas daya, pembebanan trafo, suhu, kondisi jointing, dsb.

Sementara itu, susut transformator distribusi dapat ditentukan berdasarkan hasil pengukuran energi yang dilakukan oleh Automatic Meter Reading (AMR) yang dipasang pada sisi tegangan tinggi dan tegangan rendah transformator distribusi. Besarnya susut transformator distribusi adalah selisih energi (kWh) yang terukur pada sisi tegangan tinggi transformator dengan energi (kWh) yang terukur pada sisi tegangan rendah transformator.

$$\text{Susut Trafo Distribusi} = \sum kWh_{incoming\ trafo} - \sum kWh_{outgoing\ trafo} \quad (3.4)$$



**Gambar 3.8** Letak AMR pada gardu distribusi untuk pengukuran susut transformator distribusi

Sampel data yang dipilih adalah gardu distribusi yang merupakan gardu gardu pelanggan TM dan merupakan pelanggan TR, sehingga dapat diukur besarnya susut transformator distribusi seperti pada gambar 3.7. Gardu gardu yang diambil datanya antara lain :

Gardu	Penyulang
B 104	Anggrek
B 242	Anggrek
B 238	Sotong

**Tabel 3.3.** Objek Studi Susut Transformator Distribusi

## BAB IV

### PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA

#### 4.1. HASIL SUSUT JARINGAN TEGANGAN MENENGAH

Besarnya penyusutan energi pada jaringan tegangan menengah merupakan selisih antara besar energi yang dikirimkan oleh GI dengan besaran energi yang terukur pada gardu gardu distribusi. Untuk studi susut energi pada jaringan tegangan menengah, penyulang yang diambil adalah dua buah penyulang, yaitu penyulang anggrek dan penyulang sotong. Untuk studi susut ini data energi yang digunakan adalah data dari tanggal 1 Maret 2008 sampai dengan 1 April 2008. Data energi pada penyulang Anggrek dan penyulang Sotong adalah sebagai berikut :

<b>Nama Penyulang</b>	<b>Energi (kWh)</b>
<b>Anggrek</b>	<b>2,636,480.00</b>
<b>Sotong</b>	<b>2,246,640.00</b>

**Tabel 4.1.** Data Energi Penyulang Anggrek dan Penyulang Sotong

Sedangkan hasil energi dari gardu gardu, baik dari penyulang Anggrek maupun Penyulang Sotong adalah sebagai berikut :

##### 4.1.1 Penyulang Anggrek

<b>No</b>	<b>Gardu</b>	<b>ID AMR Gardu</b>	<b>Energi (kWh)</b>	<b>Faktor kali</b>	<b>Energi Sesungguhnya</b>
1	B 17 BIS	0707070024	1159.97	320	371,190.40
2	B 17 E	0707070023	413.73	400	165,492.00
3	B 17 H	07070700013	1337.94	320	428,140.80
		0707070037	719.85	400	287,940.00
4	B 47 BIS	0707070055	423.37	240	101,608.80
5	B 91 A	0707070008	547.71	320	175,267.20
6	B 91 G	0707070048	164.72	240	39,532.80



7	B 104	0707070020	419.47	320	134,230.40
		0707070026	574.56	240	137,894.40
8	B 140	0707070056	124.92	160	19,987.20
9	B 188	0707070010	802.23	240	192,535.20
10	B 202	0707070006	278.3	240	66,792.00
		0707070009	678.99	240	162,957.60
11	B 233	0707070001	1431.73	240	343,615.20
12	B 242	0707070031	592.8	240	142,272.00
13	B 268	0707070041	433.4	200	86,680.00
14	B 268	707070039	194.2	400	77,680.00
15	B 283	TM	71.685	800	56,201.04
16	B 303	0707070042	238.34	240	57,201.60
17	B 333	0707070007	404.56	240	97,094.40
18	B 349	TM	46.66363636	800	36,584.29
19	B 390	0707070044	725.81	240	174,194.40
20	B 391	0707070035	425.7	240	102,168.00

**Tabel 4.2.** Data Energi Gardu Gardu Penyulang Anggrek

Hasil pengukuran untuk susut JTM ini berdasarkan sisi tegangan rendah. Sehingga data energi yang didapatkan dari pelanggan TM diubah terlebih dahulu menjadi sisi TR dengan asumsi terdapat susut pada trafo sebesar 2 %. Dari data tersebut, maka total energi pada setiap gardu pada penyulang Anggrek adalah sebesar 3,457,259.73 kWh. Maka besarnya susut pada jaringan tegangan menengah dapat diperhitungkan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$Susut\ JTM = \sum kWh_{penyulang} - \sum kWh_{Gardu\ Distribusi} \quad (3.1)$$

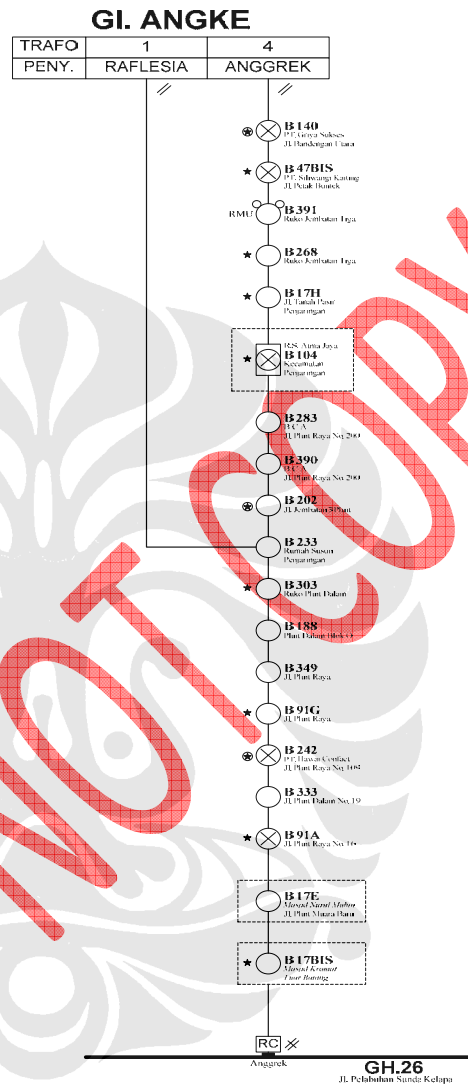
Maka besarnya susut energi pada jaringan tegangan menengah untuk penyulang Anggrek adalah sebagai berikut :

Energi Penyulang	$\sum$ Energi Gardu	Susut Energi	% susut Energi
2,636,480.00	3,457,259.73	(820,779.73)	-31.13

**Tabel 4.3.** Data Susut Energi pada Penyulang Anggrek

Dari hasil tersebut terlihat bahwa data energi yang dikirimkan oleh penyulang lebih kecil daripada jumlah energi yang terukur pada gardu gardu distribusi. Sehingga besarnya susut yang terjadi memiliki nilai negatif (minus).

Hal ini berdasarkan hasil analisa, kemungkinan disebabkan oleh adanya energi yang dikirimkan oleh penyulang lain yang masuk ke dalam jalur penyulang Anggrek. Sebagaimana dapat di lihat pada single line diagram penyulang Anggrek berikut :



**Gambar 3.3** Diagram Satu Garis Penyulang Anggrek

Dari gambar terlihat bahwa penyulang ini disuplai oleh feeder Anggrek dan feeder Raflesia. Berdasarkan hal ini, dapat disimpulkan bahwa terdapat energi yang dikirimkan oleh penyulang Raflesia ke dalam penyulang Anggrek yang menyebabkan total energi yang terukur pada gardu gardu distribusi lebih besar daripada yang dikirimkan oleh penyulang Anggrek.

#### 4.1.1.1 Simulasi Penyulang Anggrek

Kemudian dilakukan simulasi dengan menggunakan software ETAP Power Station 4.0.0 dengan diagram simulasi terlampir. Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan 80% kapasitas dari transformator distribusi dengan beban lump load berupa 100% motor. Hasil dari simulasi pada feeder Anggrek adalah sebagai berikut :

Power Demand	Apparent Losses	% Losses
11.962 MW	0.496 MW	4.146

**Tabel 4.4** Hasil Simulasi Penyulang Anggrek

Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa besarnya susut pada JTM untuk penyulang Anggrek adalah sebesar 4.146 %. Hasil ini merupakan hasil yang ideal karena tidak memperhitungkan rugi rugi sambungan di sepanjang penyulang.

#### 4.1.2 Penyulang Sotong

No	Gardu	ID AMR Gardu	Energi	Faktor kali	Energi Sesungguhnya
1	B 63 I	0707060051	401.01	240	96,242.40
2	B 78 H	0707060053	325.7	240	78,168.00
3	B 131	0707060049	399.3	240	95,832.00
4	B 148	0707060047	84.81	240	20,354.40
5	B 149	TM	38.781	400	15,202.15
6	B 153	0707060028	401.04	240	96,249.60
		0707060032	855.96	240	205,430.40
7	B 175	0707060036	422.09	240	101,301.60
		0707060040	664.45	240	159,468.00
8	B 215	0707060045	257.21	240	61,730.40
9	B 237	0707060022	0	400	0
		0707060046	498.07	200	49,807.00
10	B 238	0707060038	88.83	240	21,319.20
		0707060050	22.08	240	5,299.20
11	B 162	0707060054	2.19	240	525.60
12	B 240	0707060019	105.18	200	21,036.00
13	B 392	0707060025	905.2	120	108,624.00
14	B 412	0707060027	695.45	120	83,454.00
15	MB 1	0707060021	1187.08	240	284,899.20
16	MB 18	0707060052	509.01	240	122,162.40
17	MB 62	0707060014	351.63	320	112,521.60
18	MB 63	TM	102.52	400	40,187.84

Tabel 4.5. Data Energi Gardu Gardu Penyulang Sotong

Hasil pengukuran untuk susut JTM ini berdasarkan sisi tegangan rendah. Sehingga data energi yang didapatkan dari pelanggan TM diubah terlebih dahulu menjadi sisi TR dengan asumsi terdapat susut pada trafo sebesar 2 %. Dari data tersebut, maka total energi pada setiap gardu pada penyulang Anggrek adalah sebesar 1,779,814.99 kWh. Maka besarnya susut pada jaringan tegangan menengah dapat diperhitungkan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\text{Susut JTM} = \sum kWh_{\text{penyulang}} - \sum kWh_{\text{Gardu Distribusi}} \quad (3.1)$$

Maka besarnya susut energi pada jaringan tegangan menengah untuk penyulang Anggrek adalah sebagai berikut :

Energi Penyulang	$\sum$ Energi Gardu	Susut Energi	% susut Energi
2,246,640.00	1,779,814.99	466,825.00	20.778

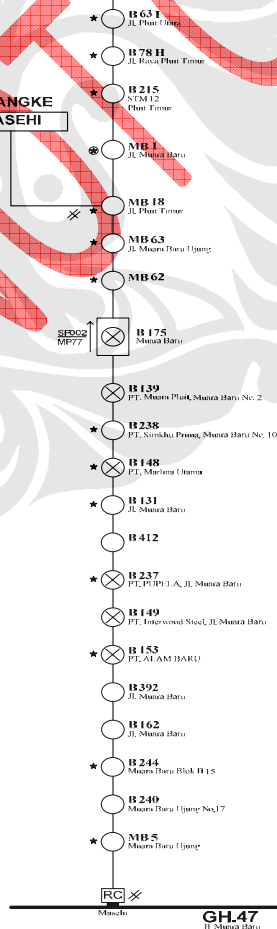
Tabel 4.6. Data Susut Energi pada Penyulang Sotong

Dari hasil di atas terlihat bahwa besarnya susut pada jaringan tegangan menengah untuk penyulang Sotong besarnya adalah 20 %. Besarnya susut ini cukup besar, mengingat hal ini terjadi pada jaringan tegangan menengah dimana nilai arus yang mengalir tidak terlalu besar, sehingga seharusnya susut daya  $i^2R$  juga harusnya kecil. Setelah dianalisa, hal ini kemungkinan besar disebabkan adanya energi dari penyulang Sotong yang masuk ke dalam jalur lain. Sebagaimana bisa di lihat pada single line diagram dari penyulang Sotong berikut :

#### GI. MUARA KARANG

TRAFU 1  
PENY. SOTONG

#### GI. ANGKE MASEHI



Gambar 3.4 Diagram Satu Garis Penyulang Sotong

Dari gambar terlihat bahwa terdapat dua feeder ke dalam penyulang ini, yaitu dari GI Angke berupa penyulang Masehi dan dari GI Muara Karang yaitu penyulang Sotong itu sendiri. Sehingga dari hal ini dapat diambil kesimpulan bahwa kemungkinan susut yang nilainya besar ini diakibatkan adanya energi yang mengalir dari penyulang Sotong menuju penyulang Masehi dan energi ini belum diketahui besarnya.

Kemungkinan lain adalah adanya kesalahan pengukuran pada AMR di gardu B 237, dimana AMR dengan id 0707060022 menunjukkan jumlah energi selama satu bulan besarnya adalah 0 kWh. Hal ini dirasa tidak wajar, karena ketika dilakukan inspeksi terhadap gardu tersebut, pada kedua rak tegangan rendah yang ada menunjukkan besar nilai arus yang besar kurang lebih 48 ampere di setiap fasanya. Sehingga seharusnya terdapat energi yang terukur pada AMR tersebut. Apabila energi yang terukur pada gardu B 237 pada AMR dengan id 0707060022 diperkirakan sama besarnya dengan energi yang terukur pada gardu B 237 pada AMR dengan id 0707060046, yaitu sebesar 498.07 kWh dengan faktor kali 400, maka diperkirakan besarnya susut pada penyulang Sotong akan menjadi sebagai berikut :

<b>Energi Penyulang</b>	$\sum$ <b>Energi Gardu</b>	<b>Susut Energi</b>	<b>% susut Energi</b>
2,246,640.00	1,979,042.99	267,597.008	11.911

**Tabel 4.7.** Data Susut Energi pada Penyulang Sotong

Dari hasil ini dapat terlihat bahwa besarnya susut berkurang secara signifikan menjadi 11.91 %. Besarnya susut dapat lebih kecil lagi, apabila ternyata ada energi dari penyulang Sotong yang masuk ke dalam penyulang Masehi sebagaimana telah diutarakan sebelumnya.

#### **4.1.2.1 Simulasi Penyulang Sotong**

Kemudian dilakukan simulasi dengan menggunakan software ETAP Power Station 4.0.0 dengan diagram simulasi terlampir. Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan 80% kapasitas dari transformator distribusi dengan beban lump load berupa 100% motor. Hasil dari simulasi pada feeder Sotong adalah sebagai berikut :

<b>Power Demand</b>	<b>Apparent Losses</b>	<b>% Losses</b>
11.549 MW	0.713 MW	6.174

**Tabel 4.8** Hasil Simulasi Penyulang Sotong

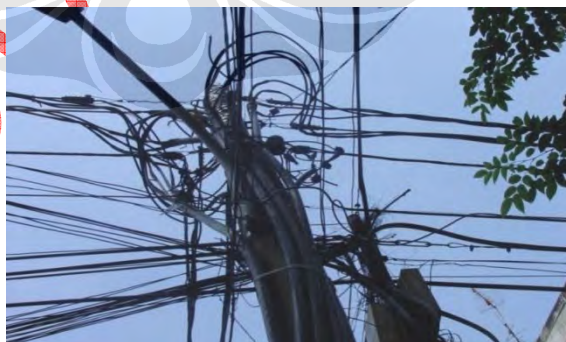


## 4.2. HASIL SUSUT JARINGAN TEGANGAN RENDAH

Secara umum kondisi fisik JTR dan SR pada gardu B233 cukup baik. Namun, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan antara lain kondisi tiang listrik dan kerapihan JTR. Beberapa tiang listrik JTR diidentifikasi sudah miring yang mungkin disebabkan oleh kondisi tanah. Jika hal ini dibiarkan dapat membahayakan bagi keselamatan manusia. Kemudian, kondisi JTR yang termasuk ke dalam GD B233 diidentifikasi tidak rapih dan bendera jurusan di tiang listrik sudah tidak ada. Hal ini akan mempersulit identifikasi dan penanganan gangguan di JTR. Berikut ini beberapa gambar kondisi JTR yang termasuk ke dalam GD B233.



**Gambar 4.1.** Kondisi Tiang Listrik yang Miring



(a)





(b)






(c)

**Gambar 4.2.** Kondisi JTR yang Tidak Rapih

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa dalam studi susut JTR ini dilakukan pengukuran energi di outgoing rak TR dan pembacaan energi di kWh Meter dalam rentang waktu yang sama. Berikut ini adalah diagram waktu pengukuran energi di JTR.

	11/12/2007 12:00	19/12/2007 12:00	02/01/2008 10:15	02/01/2008 11:30	09/01/2008 12:00
PQA	Start		Stop	Start	Stop
kWh Meter	Read	Read	Read	Read	Read

	: Periode 1
	: Periode 2
	: Energi Tak Terukur PQA

**Gambar 4.3.** Diagram Waktu Pengukuran Energi di JTR

#### 4.2.1. Outgoing Rak TR

Berdasarkan pengukuran energi menggunakan Power Quality Analyzer, diperoleh besarnya energi yang dikirimkan dari rak TR selama rentang waktu pada gambar 4.1 adalah sebagai berikut :

	kWh		
Jurusan	Periode 1	Periode 2	Total
8	19889.0	6166.9	26005.9

	kVarh		
Jurusan	Periode 1	Periode 2	Total
8	7253.5	2317.0	9570.4

	kVAh		
Jurusan	Periode 1	Periode 2	Total
8	21364.9	6646.8	28011.7

Tabel 4.9 Hasil Pengukuran Energi Outgoing Rak TR

#### 4.2.2. kWh Meter Pelanggan

Berdasarkan pembacaan kWh Meter pelanggan di kedua jurusan, diperoleh energi yang terpakai oleh pelanggan selama rentang waktu seperti pada gambar 4.1 sebagai berikut :

	kWh meter			
Jurusan	Periode 1	Periode 2	Periode 3	Total
8	5433.9	8355.8	4084.2	17873.9

Tabel 4.10. Energi Terpakai Oleh Pelanggan Berdasarkan Pembacaan kWh Meter

#### 4.2.3. Susut Jaringan Tegangan Rendah

Dari hasil pengukuran energi pada outgoing rak TR di jurusan 8 serta hasil pembacaan energi di kWh Meter pelanggan, maka dapat dihitung besarnya susut energi pada jaringan tegangan rendah dengan menggunakan persamaan berikut :

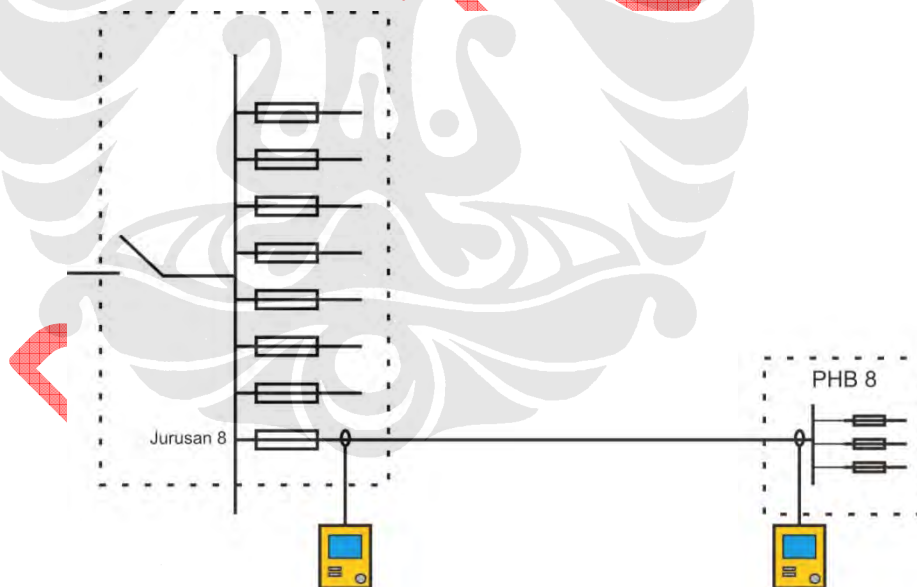
$$Susut JTR = \sum kWh_{PQA} - \sum kWh_{kWh\ Meter\ Pelanggan} \quad (3.2)$$

Hasil perhitungan susut energi di JTR selama kurang lebih satu bulan dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Jurusan	Pengukuran Energi (kWh)		Susut Energi	
	Outgoing Rak TR	Meter Pelanggan	Susut (kWh)	% Susut
8	26055.89	17873.9	8182.0	31.40

Tabel 4.11. Hasil Pengukuran Susut Jaringan Tegangan Rendah

Untuk memastikan kebenaran besarnya susut yang terjadi pada JTR, maka dilakukan pengambilan data kembali namun mengambil titik sampling yang berbeda dengan sebelumnya. Metode pengambilan datanya adalah dengan menggunakan power quality analyzer (PQA) yang dipasang pada jurusan 8 kemudian dipasang pula pada panel hubung bagi (PHB) dari jurusan 8. Skematik pengambilan datanya adalah sebagai berikut :



Gambar 4.4. Skema Pengambilan Data Susut JTR

Untuk menghitung besarnya susut energi yang terjadi pada JTR, maka digunakan persamaan berikut :

$$Susut_{JTR} = \sum kWh_{PQA\ jur\ 8} - \sum kWh_{PQA\ PHB\ 8} \quad (4.1)$$

Dimana untuk mendapatkan besarnya persentase susut energi berdasarkan hasil pengukuran akan digunakan persamaan berikut :

$$\% \text{Susut}_{JTR} = \frac{\text{Susut}_{JTR}}{\sum kWH_{PQA} + \text{Susut}_{JTR}} \cdot 100 \% \quad (4.2)$$

Dari hasil pengukuran pada hari Selasa tanggal 25 Maret 2008 pada pukul 17:37:30 sampai dengan pukul 21:57:30 didapatkan hasil sebagai berikut :

Jurusan	Pengukuran kWh		Susut Energi	
	Outgoing Rak TR	PHB	Susut kWh	% Susut kWh
8	177.862	172.986	4.876	<b>2.742</b>

Tabel 4.12. Penyusutan Energi pada JTR

Walaupun besarnya penyusutan energi pada JTR lebih kecil daripada hasil perhitungan sebelumnya, tetap saja besar penyusutan sebesar ini terlalu besar untuk jarak dari rak tr menuju PHB yang hanya 166.15 meter. Untuk memastikan kebenaran besarnya penyusutan ini maka dilakukan perhitungan besarnya susut energi secara matematis. Besarnya penyusutan energi pada JTR secara matematis dapat diperhitungkan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\text{Susut}_{JTR} = i^2 \cdot R \cdot t \quad (4.3)$$

Dimana  $I$  merupakan arus yang mengalir di setiap fasa selama rentang waktu pengukuran. Sementara  $R$  adalah nilai resistansi dari kabel 70 mm<sup>2</sup> dengan inti aluminium yaitu sebesar 0.50995 Ω/km. Dan  $t$  adalah rentang waktu pengukuran. Sementara untuk menghitung besarnya persentase susut energi berdasarkan hasil pengukuran akan digunakan persamaan berikut :

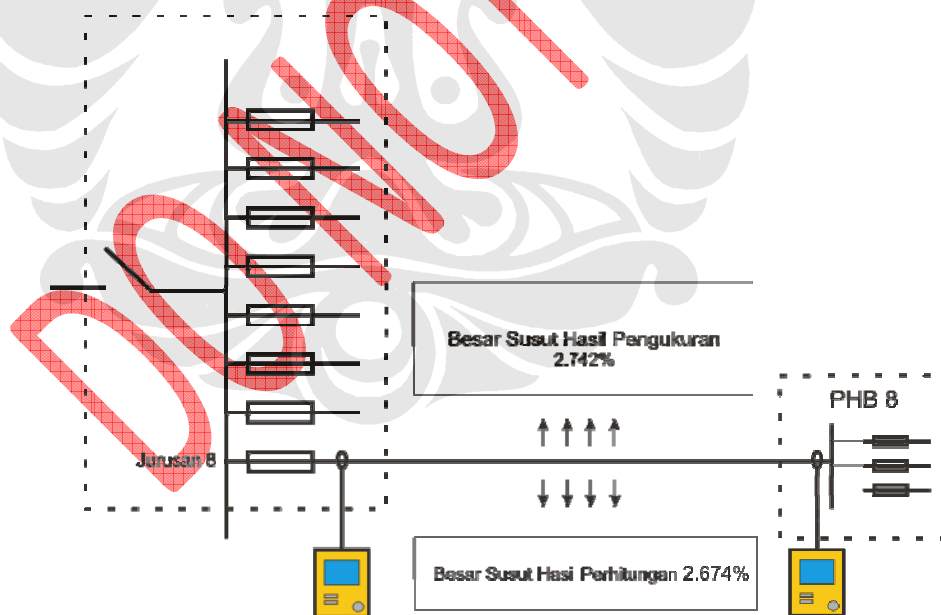
$$\% \text{Susut}_{JTR} = \frac{\text{Susut}_{JTR}}{\sum kWH_{PQA} + \text{Susut}_{JTR}} \cdot 100 \% \quad (4.2)$$

Berdasarkan hasil perhitungan maka besarnya susut energi secara teknis seharusnya adalah sebagai berikut :

	Outgoing Rak TR	Susut Energi (kWh)			% Susut
		Fasa 1	Fasa 2	Fasa 3	
	177.862	1.15697	2.54974	1.04588	
<b>Total</b>	177.862	<b>4.75260</b>			<b>2.674</b>

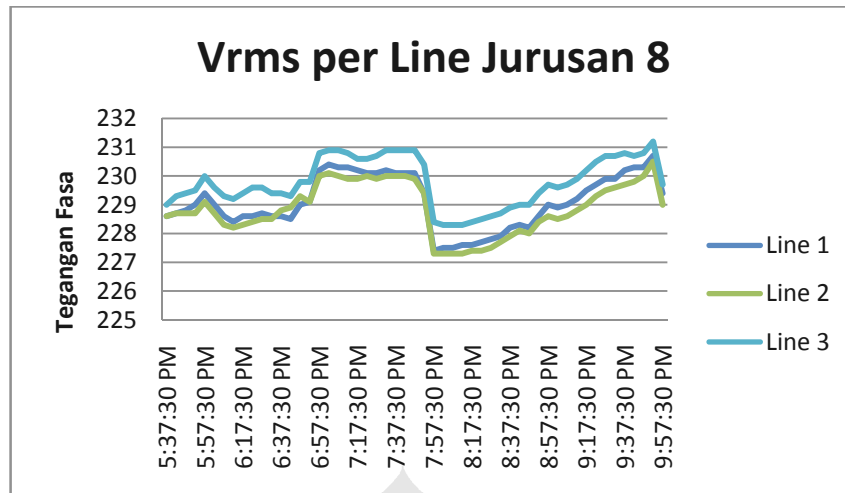
Tabel 4.13. Hasil Penyusutan Energi JTR melalui Perhitungan

Dari hasil perhitungan dapat dilihat bahwa besarnya penyusutan teknis seharusnya hanya sebesar 2.674 %. Sedangkan dari hasil pengukuran didapatkan bahwa besarnya penyusutan adalah 2.742 %. Sehingga dari hasil ini dapat dilihat bahwa terdapat susut energi sebesar 0.068 % atau sebesar 12.095 kWh yang hilang dalam jangka waktu pengambilan data dari pukul 17:37:30 sampai dengan pukul 21:57:30 atau sekitar 4 jam 20 menit. Kemungkinan besar, adanya susut ini dikarenakan adanya jointing yang kurang sempurna di sepanjang jaringan tegangan rendah pada objek studi.

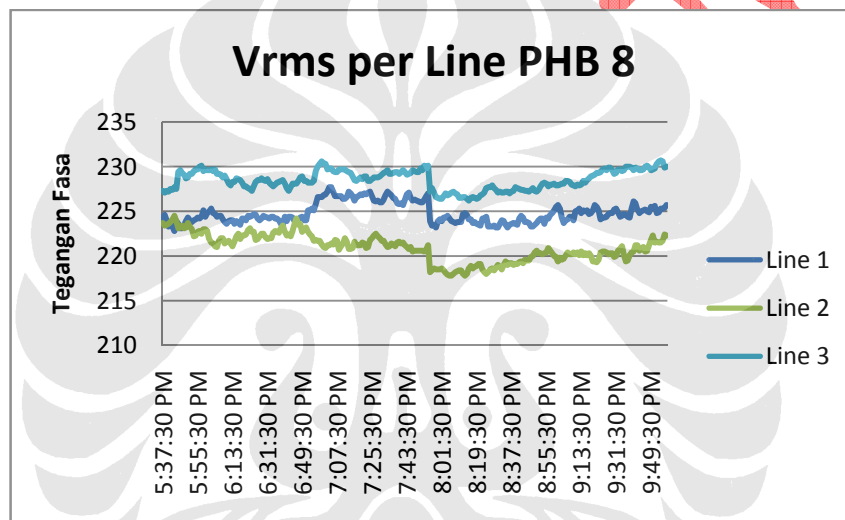


Gambar 4.5. Perbandingan Susut JTR melalui Pengukuran dan Perhitungan

Besarnya susut energi ini dapat terindikasi dari dua hal, yaitu perbandingan tegangan pada jurusan 8 dan PHB 8 tersebut serta perbandingan arus yang ada pada jurusan 8 dan PHB 8. Berikut ini adalah grafik tegangan dari dari jurusan 8 dan PHB 8 selama rentang waktu pengambilan data :



Gambar 4.6. Grafik Tegangan Fasa Jurusan 8



Gambar 4.7. Grafik Tegangan Fasa PHB 8

Dari gambar 4.6 dan gambar 4.7 diatas dapat terlihat bahwa tegangan fasa pada jurusan 8 dan PHB 8 selama pengukuran cukup berfluktuasi sebagaimana diperlihatkan pada tabel berikut :

Titik Pengukuran	MIN			MAX			AVERAGE		
	Line1	Line 2	Line 3	Line1	Line 2	Line 3	Line1	Line 2	Line 3
Jurusan 8	227.4	227.3	228.3	230.7	230.5	231.2	229.1	228.8	229.7
PHB 8	222.8	217.8	226.2	227.7	224.5	230.7	224.8	220.9	228.5
VD	4.6	9.5	2.1	7	6	0.5	4.3	7.9	1.2
% VD	2.0229	4.1795	0.9198	3.034	2.603	0.216	1.877	3.453	0.522

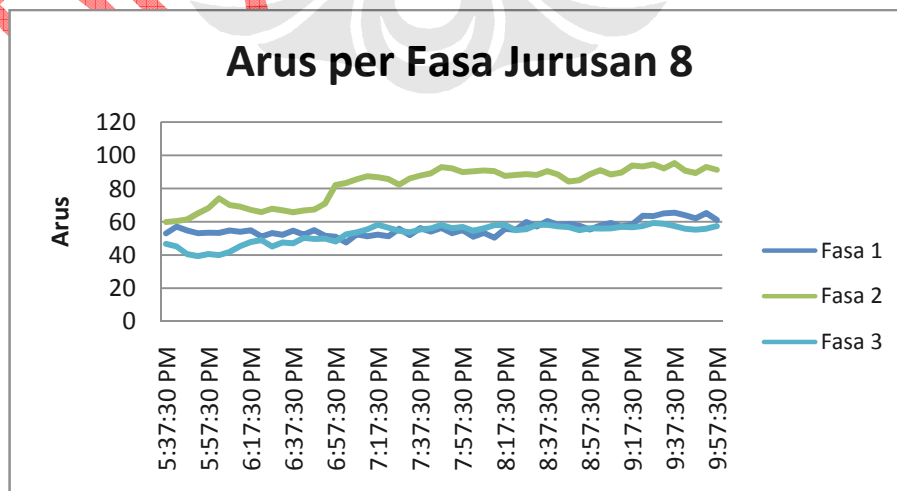
Tabel 4.14. Hasil Pengukuran Tegangan Fasa

Dari tabel dapat dilihat bahwa besarnya nilai tegangan fasa pada jurusan 8 berfluktuasi dengan nilai rata rata line 1 sebesar 229.1 V, line 2 sebesar 228.8 V,

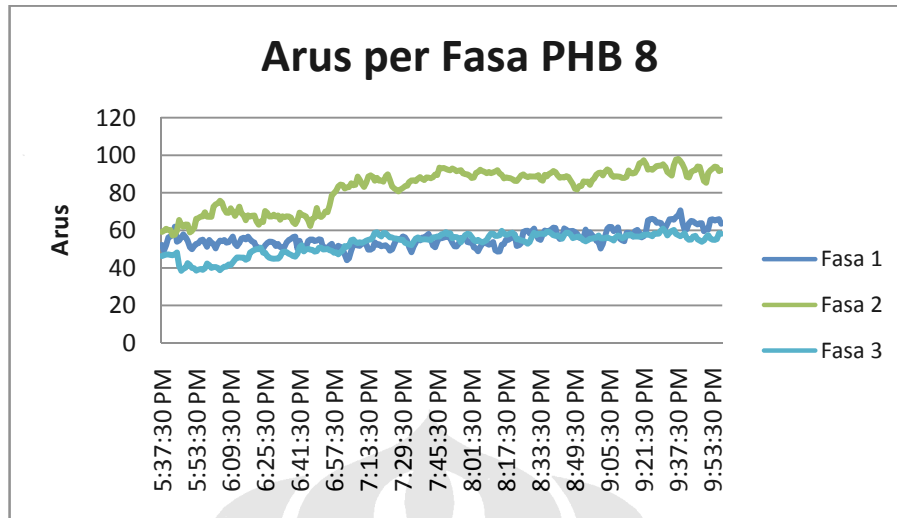
dan line 3 sebesar 229.7 V. Nilai tegangan fasa ini sudah sesuai dengan ketentuan yang berlaku, mengingat besarnya nilai tegangan fasa secara normal adalah sebesar 220 - 240 V. Hal ini kemungkinan besar diakibatkan nilai tegangan yang dikirim oleh PLN dalam transmisi dan distribusinya diatur agar lebih besar dari kondisi normal untuk menghindari terjadinya jatuh tegangan pada sisi penerima. Sehingga diharapkan pada sisi pelanggan, dalam hal ini akan ditunjukkan pada PHB 8, nilai tegangan yang diterima sebesar nilai tegangan normal fasa, yaitu 220 – 240 V. Sementara hasil pengukuran pada PHB 8 menunjukkan bahwa nilai rata rata line 1 sebesar 224.8 V, line 2 sebesar 220.9 V, dan line 3 sebesar 228.5 V. Hasil pengukuran menunjukkan terjadi jatuh tegangan pada sisi PHB. Jatuh tegangan rata rata yang terjadi yaitu 4.3 V pada line 1, 7.9 V pada line 2, dan 1.4 V pada line 3.

Jatuh tegangan sebenarnya merupakan hal yang pasti terjadi pada rangkaian yang bersifat seri, dimana nilai tegangan pada sisi penerima akan lebih kecil daripada nilai tegangan pada sisi pengirim. Hal ini disebabkan seiring dengan panjangnya penghantar, maka nilai resistansi juga akan bertambah. Selain itu adanya daya reaktif yang muncul juga akan menyebabkan jatuh tegangan pada sisi penerima. Nilai tegangan jatuh dari jurusan 8 menuju PHB 8 nampaknya normal, karena besar penurunan tegangannya terlihat normal untuk jarak jurusan 8 dan PHB 8 sebesar 166.15 meter.

Sementara itu, grafik yang menunjukkan arus yang mengalir pada jurusan 8 dan PHB 8 adalah sebagai berikut :



Gambar 4.6. Grafik Arus pada Jurusan 8



Gambar 4.7. Grafik Arus pada PHB 8

Gambar gambar di atas adalah grafik arus dari dari jurusan 8 dan PHB 8 selama rentang waktu pengambilan data.

Sesuai dengan persamaan hukum Kirchoff tentang arus, seharusnya total arus yang masuk ke dalam satu titik jumlahnya akan sama dengan arus yang keluar dari titik tersebut. Namun dari data yang didapatkan terlihat bahwa, arus yang datang dari jurusan 8 lebih besar daripada arus yang ada pada PHB 8. Artinya di sepanjang perjalanan dari jurusan 8 menuju PHB 8 terdapat beban tidak tercatat lain yang terpasang sehingga terdapat arus yang mengalir ke beban terpasang tersebut. Sebagaimana tertera pada tabel berikut :

Titik Pengambilan Data	Fasa 1	Fasa 2	Fasa 3
Jurusan 8	55.849	82.313	52.857
PHB 8	55.733	82.244	52.849
Selisih	0.116	0.069	0.008

Tabel 4.15 Perbandingan Rata-Rata Arus pada Jurusan 8 dan PHB 8

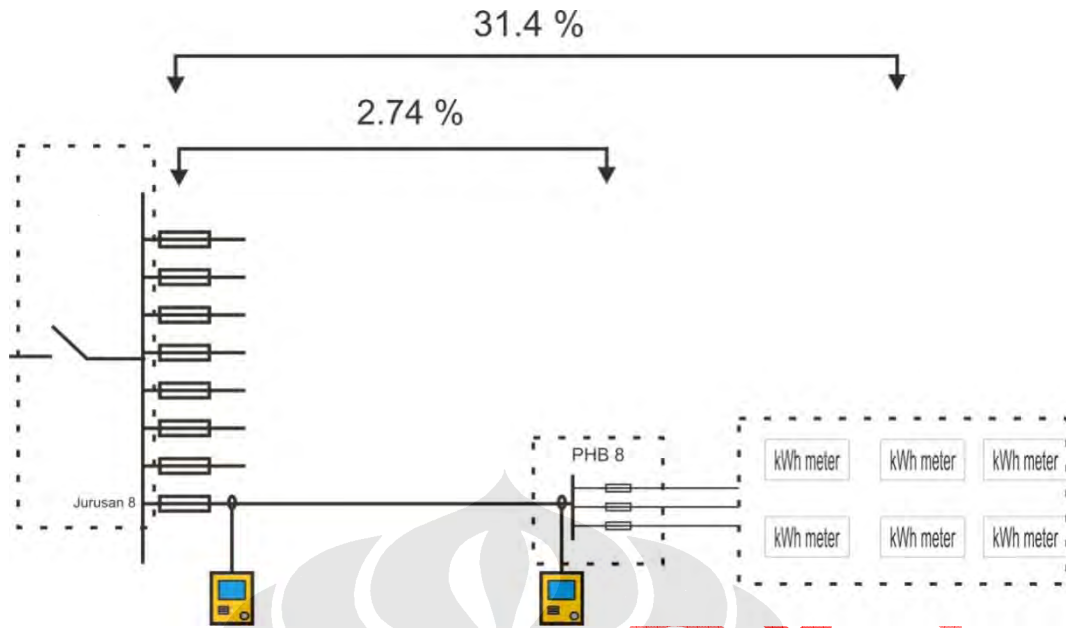
Namun besarnya arus yang hilang disepanjang perjalanan dari jurusan 8 menuju PHB 8 terlihat tidak signifikan, besarnya arus yang hilang dari fasa 1 adalah sebesar 0.116 A, dari fasa 2 adalah 0.069, dan dari fasa 3 adalah 0.008 A. Ini menunjukkan, walaupun mungkin ada beban-beban tidak tercatat lainnya, namun besarnya konsumsi energi beban beban tersebut tidak seberapa.



#### 4.2.4. Perbandingan Susut kWh Meter Pelanggan dengan Susut pada PHB

Dari hasil pengambilan data sebanyak dua kali pada jaringan tegangan rendah namun dengan titik pengukuran yang berbeda, yaitu jurusan 8 dengan kWhmeter pelanggan, serta jurusan 8 dengan PHB 8, didapatkan data susut yang memiliki perbedaan cukup besar. Pada pengukuran pertama kali dengan titik pengambilan data pada jurusan 8 dan kWh meter pelanggan, besarnya susut yang terjadi adalah sebesar 31.4 %. Susut energi ini teramat besar jika dibandingkan dengan susut yang ada pada pengukuran kedua dengan titik pengambilan data dari jurusan 8 menuju panel hubung bagi 8 yang hanya sebesar 2.742 %. Terdapat selisih susut energi yang teramat besar, yaitu sebesar 28.658 % yang terjadi diantara panel hubung bagi 8 dengan ruangan kWh meter pelanggan.

Adanya selisih yang besar ini menunjukkan bahwa kemungkinan besar terjadi pencurian listrik di bagian SR (sambungan rumah) yang berada pada ruang kWh meter menuju pelanggan. Karena dari hasil pengukuran dan perhitungan, telah terbukti bahwa besarnya susut dari outgoing rak TR (jurusan 8) menuju PHB 8, selisih persentase susut antara hasil pengukuran dan perhitungan sangat kecil yaitu 0,068 % saja. Sehingga data tersebut dapat dipertanggung jawabkan kebenarannya. Sehingga kemungkinan selisih susut energi sebesar 28.658 % tersebut kemungkinan besar terjadi di bagian SR atau di ruang kWh meter dimana ada kemungkinan kWh meter pelanggan mengukur secara tidak tepat. Atau bahkan ada kemungkinan kWh meter pelanggan tersebut telah diubah ubah sehingga hasil pengukurannya tidak akurat lagi. Penggambaran susut yang terjadi pada jaringan tegangan rendah ditunjukkan oleh **gambar 4.10** berikut :



**Gambar 4.10.** Perbandingan Susut pada JTR

Di sisi pelanggan, terdapat beberapa hal yang juga harus diperhatikan mengenai kondisi alat ukur energi pelanggan (kWh Meter). Kondisi beberapa kWh meter teridentifikasi terpasang miring. Karena kWh meter yang digunakan masih kWh meter analog, maka pemasangan kWh meter yang miring dapat menyebabkan pengukuran energi tidak akurat. Selain itu, segel di beberapa kWh meter teridentifikasi tidak terpasang dengan baik sehingga rawan terjadinya pencurian listrik. Sebagaimana ditunjukkan oleh gambar berikut :



(a) kWh Meter Miring



(b) Segel kWh Meter Terbuka

**Gambar 4.11.** Kondisi kWh Meter pelanggan

#### 4.3. HASIL SUSUT ENERGI PADA GARDU DISTRIBUSI

Rak tegangan rendah di GD B233 terbagi menjadi 8 jurusan. Semua jurusan pada rak TR tersebut menggunakan pemutus lebur (fuse) sebagai pembatas arus dan *isolating switch* tipe 3 pole pada sisi incomingnya. Spesifikasi rinci rak TR pada GD B233 diberikan pada **tabel 4.14**.

URAIAN	SPESIFIKASI KABEL (3 Fasa)	SPESIFIKASI FUSE (A)		
		R	S	T
INCOMING	3x300mm <sup>2</sup> + 2x300mm <sup>2</sup>	ISOLATING SWITCH 3 POLE		
JURUSAN 1	1x70mm <sup>2</sup> +1x50mm <sup>2</sup>	315	315	250
JURUSAN 2	1x70mm <sup>2</sup> +1x50mm <sup>2</sup>	250	250	250
JURUSAN 3	1x70mm <sup>2</sup> +1x50mm <sup>2</sup>	400	250	250
JURUSAN 4	1x70mm <sup>2</sup> +1x50mm <sup>2</sup>	250	250	315
JURUSAN 5	1x70mm <sup>2</sup> +1x50mm <sup>2</sup>	250	250	250
JURUSAN 6	1x70mm <sup>2</sup> +1x50mm <sup>2</sup>	250	250	250
JURUSAN 7	1x70mm <sup>2</sup> +1x50mm <sup>2</sup>	250	250	250
JURUSAN 8	1x70mm <sup>2</sup> +1x50mm <sup>2</sup>	250	250	250

**Tabel 4.16.** Spesifikasi Rak TR di GD B233

Dari inspeksi visual dan pengukuran yang telah dilakukan diketahui kondisi eksisting rak TR di GD B233 sebagai berikut :

No.	URAIAN	KONDISI	KETERANGAN
1.	Kabel Tray	Baik	Dipasang Grounding
2.	Isolating Switch	Buruk	Ada bekas terbakar
3.	Busbar	Buruk	Ada bekas oksidasi dan Rusak
4.	Isolator Tumpu Busbar	Baik	
5.	Ground Plate	Baik	

6.	Fasilitas PJU	Ada	
7.	Alat ukur V dan I	Buruk	Voltmeter tidak ada, Amperemeter tidak berfungsi
8.	Grounding	Baik	
9.	Kabel Schoen	Baik	
10.	Kontak pemegang Fuse	Buruk	Ada bekas terbakar

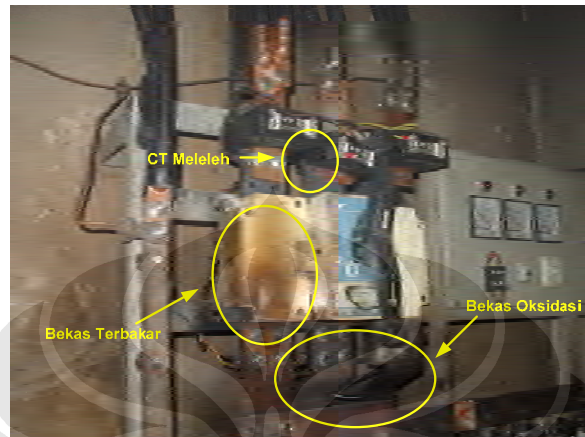
**Tabel 4.17.** Kondisi Fisik Rak TR di GD B233 Berdasarkan Pengamatan

URAIAN	TEMPERATUR (°C)			
	R	S	T	N
INCOMING	45.2	55.2	47.4	39.2
	51.2	49.8	43.4	
JURUSAN 1	57.2	45.4	41.8	
	38.8	36.8	34.8	
JURUSAN 2	54.2	51.2	50.0	
	53	42.4	38.8	
JURUSAN 3	134.8	65.4	44.8	
	80.2	53.4	36.8	
JURUSAN 4	51.2	43.4	38.8	
	40.6	36.4	34.2	
JURUSAN 5	71.4	48.4	44.6	
	65.3	38.4	37.2	
JURUSAN 6	52.6	57.6	47.8	
	51.4	49.4	36.2	
JURUSAN 7	44.3	42.0	40.0	
	37.4	36.2	34.4	
JURUSAN 8	40.8	41.2	46.0	
	36.8	35.0	35.6	

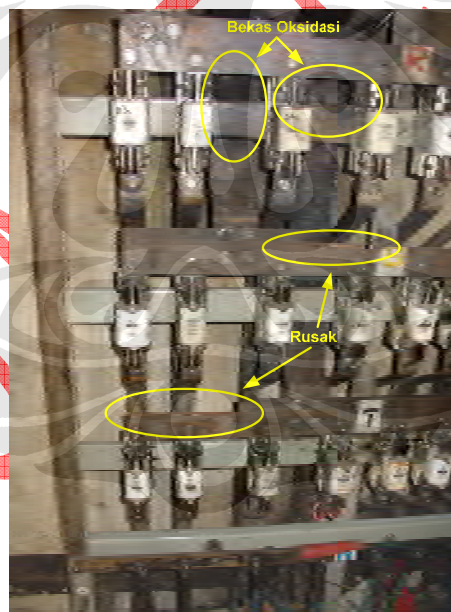
**Tabel 4.18.** Hasil Pengukuran Temperatur di Rak TR GD B233

Secara umum kondisi fisik rak TR di GD B233 dapat dikatakan buruk. Hal ini mengacu pada hasil pengamatan dimana banyak terdapat bekas terbakar dan bekas oksidasi pada rak TR seperti ditunjukkan pada **gambar 4.9**. Munculnya bekas terbakar dan oksidasi tersebut bisa disebabkan karena tingginya temperatur ketika beban puncak. Tingginya temperatur tersebut juga mengakibatkan CT yang

digunakan untuk AMR meleleh (**gambar 4.9**). Selain itu, kondisi busbar sudah mengalami kerusakan seperti yang ditunjukkan pada **gambar 4.9**. Rusaknya busbar ini dapat mengakibatkan naiknya impedansi busbar dan membesarnya susut pada rak TR.



(1)



(2)

**Gambar 4.12.** Kondisi Fisik Rak TR di GD B233

Tingginya temperatur pada beberapa bagian busbar selain terlihat dari kondisi fisik busbar juga terbukti dari hasil pengukuran temperatur yang diberikan tabel 4.9. Pengukuran temperatur busbar tersebut dilakukan pada siang hari yaitu sekitar pukul 11.00 WIB dimana pada waktu tersebut beban puncak gardu belum

terjadi. Beban puncak pada GD B233 terjadi pada malam hari yaitu sekitar pukul 21.00 WIB.

Dari hasil pengukuran tersebut, terlihat temperatur yang sangat tinggi di beberapa titik busbar bahkan mencapai 134,8°C. Temperatur yang tinggi ini disebabkan kondisi jointing-jointing pada busbar yang tidak baik sehingga menyebabkan terjadinya busur pada jointing dan naiknya temperatur jointing. Dengan kondisi jointing yang buruk dan naiknya temperature jointing tersebut juga menyebabkan naiknya susut pada rak TR. Jika beban puncak terjadi, maka temperatur pada busbar tersebut dapat lebih tinggi lagi.

#### 4.3.1 Susut Energi pada Rak TR

Susut energi pada rak TR dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini :

$$Susut\ Rak\ TR = \sum kWh_{incoming\ rak\ TR} - \sum kWh_{outgoing\ rak\ TR} \quad (3.3)$$

Dengan menggunakan persamaan di atas dan hasil pengukuran pada rak TR seperti pada tabel 4.11, maka diperoleh susut energi pada rak TR selama satu minggu sebagai berikut :

KETERANGAN	ENERGI
Total Energi Incoming Rak TR	78,400.80 kWh
Total Energi Outgoing Rak TR	78,037.93 kWh
<b>Susut Energi Rak TR</b>	<b>362.87 kWh</b>
	<b>0.463 %</b>

**Tabel 4.19** Perhitungan Susut Energi Pada Rak TR

Dengan demikian, berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan diperoleh susut energi pada rak TR selama satu minggu yaitu sebesar 362,87 kWh atau sebesar 0,463% dari energi yang masuk ke rak TR (incoming). Dilihat dari persentase susut energinya, maka dapat dikatakan bahwa susut energi pada rak TR cukup besar. Hal ini salah satunya ternyata disebabkan adanya kesalahan pada data rekaman pada alat A3Q yang dipergunakan untuk merekam data pada incoming rak tr.

Oleh karena itu untuk memastikan besarnya susut energi pada rak tr dilakukan pengukuran ulang. Hanya saja untuk merekam data kali ini pada

incoming rak tr dipergunakan PQA yang sama dengan PQA yang dipergunakan pada outgoing rak tr, sehingga diharapkan data yang direkam dapat lebih akurat. Maka diperoleh data selama 9 hari dari tanggal 25 Maret 2008 pukul 20.32 sampai dengan tanggal 2 April 2008 pukul 06.27 sebagai berikut :

<b>Keterangan</b>	<b>Energi</b>	
<b>Incoming</b>	85077.711	kWH
<b>Jurusan 1</b>	8469.653	kWH
<b>Jurusan 2</b>	15557.671	kWH
<b>Jurusan 3</b>	17822.684	kWH
<b>Jurusan 4</b>	2628.455	kWH
<b>Jurusan 5</b>	11030.408	kWH
<b>Jurusan 6</b>	16009.159	kWH
<b>Jurusan 7</b>	6812.121	kWH
<b>Jurusan 8</b>	6709.866	kWH

Tabel 4.20. Hasil Pengukuran Rak Tegangan Rendah

Dari data seperti pada tabel 4.14 diatas, maka besarnya penyusutan pada rak tr adalah sebagai berikut :

<b>Keterangan</b>	<b>Energi</b>	
Total Incoming Rak TR	85077.711	kWH
Total Outgoing Rak TR	85040.020	kWH
<b>Susut Energi Rak TR</b>	<b>37.692</b>	kWH
<b>% susut Energi</b>	<b>0.044%</b>	

Tabel 4.21 Susut Energi pada Rak TR

Dari hasil pengambilan data diatas dapat kita ketahui bahwa penyusutan pada rak tr cukup kecil, hanya sekitar 0.004 % selama jangka waktu pengambilan data. Hal ini sudah cukup baik mengingat ukuran panjang dari rak tr hanya sekitar 2 meter. Dari data susut yang kita miliki, dapat kita perkirakan besarnya hambatan pada rak tr dengan menggunakan persamaan berikut :



$$W_{Losses} = i^2 R$$

$$R = \frac{W_{Losses}}{i^2} \quad (4.4)$$

Besarnya arus rata rata yang mengalir pada rak tr pada saat pengukuran adalah sebesar 2511.84 A dan susut energi pada rak tr adalah sebesar 37.692 kWh atau setara dengan 452301.33 Watt, maka besarnya hambatan dari rak tr diperkirakan adalah sebesar 0.071  $\Omega$ .

#### 4.3.2. Susut Energi pada Transformator Distribusi

Untuk studi penyusutan pada transformator distribusi, maka akan diambil data pada incoming transformator tersebut dan pada outgoing transformator yang akan masuk ke rak tegangan rendah. Untuk studi ini, maka dipilih gardu gardu dengan pelanggan tegangan menengah dan pelanggan tegangan rendah. Sehingga untuk mendapatkan besarnya susut energi yang terjadi adalah dengan menggunakan data energi yang tercatat pada AMR pada sisi TM dan data AMR pada sisi TR. Besarnya susut energi yang ada dapat dicari dengan persamaan berikut :

$$Susut\ Trafo\ Distribusi = \sum kWh_{incoming\ trafo} - \sum kWh_{outgoing\ trafo} \quad (3.4)$$

Dari data pelanggan TM dan data AMR yang sebelumnya telah dimiliki, maka didapatkan data penyusutan energi pada trafo adalah sebagai berikut :

Gardu	Merk	Kapasitas trafo	Data Pelanggan TM PLN	AMR Indoelectric	Susut Trafo	% susut
<b>B 104</b>	Unindo	630 kVA	139,553.60	137,894.40	1,659.20	1.19
<b>B 242</b>	Unindo	630 kVA	145,193.60	142,272.00	2,921.60	2.01
<b>B 238</b>	Unindo	630 kVA	22,632.80	21,319.20	1,313.60	5.80

Tabel 4.22. Hasil Pengukuran Susut pada Transformator Distribusi

Dari tiga gardu diatas, terlihat bahwa besarnya susut pada trafo di B 104 dan B 242 cukup wajar, yaitu sebesar 1.19 % dan 2.01 %. Sementara pada gardu B 238 besarnya susut yang terjadi pada trafo cukup besar, yaitu 5.80 %.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

1. Besarnya susut Jaringan Tegangan Menengah pada penyulang berdasarkan hasil pengukuran adalah sebesar 11.911 % sampai dengan 20.778 %.
2. Dari hasil simulasi besarnya susut energi pada JTM adalah antara 4.146 % sampai dengan 6.174 %.
3. Hasil susut energi berdasarkan pengukuran pada Jaringan Tegangan Rendah dari outgoing jurusan 8 menuju ruang kWh meter adalah sebesar 2.742 % sampai dengan 31.4 %.
4. Hasil susut energi pada rak TR berdasarkan pengukuran pada GD B 233 adalah sebesar 0.044 %.
5. Besarnya resistansi pada rak tr berdasarkan perhitungan adalah sebesar 0.071 ohm.
6. Hasil susut energi berdasarkan pengukuran pada transformator distribusi adalah antara 1.19 % sampai dengan 5.80%.

## DAFTAR ACUAN

- [1] Electrical Transmission and Distribution Reference Book, Oxford & IBH Publishing Company, New Delhi 1950.
- [2] Short, Tom, Electric Power Distribution Handbook, CRC Press, London, 2004, Chapter 1 – 3.
- [3] “The Effect of Reduced Voltage on The Operation & Efficiency of Electric System”, Electric Power System Research, Vol. 1 EPRI EL 3591, Juni, 1984.
- [4] Chapman, Stephen J., Electric Machinery and Power System Fundamentals International Edition, McGraw Hill, Singapore, 2002, hal. 448 – 482.
- [5] Cory, B.J., B.M. Weedy, Electric Power System Fourth Edition, Wiley, England, 1998. Hal 83 – 85.
- [6] “Introduction to Arcing Contact”, Brush Wellman Engineered Materials, Vol. 4 no. 10, Oktober, 2002.
- [7] “The Effects of Arcing”, Brush Wellman Engineered Materials, Vol.4 no.11, November, 2002.
- [8] Schultz, K.R., “Distribution Primary Feeder I<sup>2</sup>R Losses”, IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS 97 no. 2, Maret/April, 1978, hal 603 - 609.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Chang, Nelson E., "Determination of Primary Feeder Losses", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS 97 no. 2, Desember, 1968, hal. 1991 – 1994.
2. Chapman, Stephen J., Electric Machinery and Power System Fundamentals International Edition, McGraw Hill, Singapore, 2002, hal. 448 – 482.
3. Cory, B.J., B.M. Weedy, Electric Power System Fourth Edition, Wiley, England, 1998. Hal 83 – 85.
4. Endansari S, Dona, "Studi Perhitungan Susut Teknis Pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik", Jurusan Elektro FTUI, Jakarta, 1989.
5. Electrical Transmission and Distribution Reference Book, Oxford & IBH Publishing Company, New Delhi 1950.
6. Gonen, Turan, Electrical Power Distribution System Engineering, McGraw Hill, Singapore, 1986.
7. "Introduction to Arcing Contact", Brush Wellman Engineered Materials, Vol. 4 no. 10, Oktober, 2002.
8. Schultz, K.R., "Distribution Primary Feeder  $I^2R$  Losses", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS 97 no. 2, Maret/April, 1978, hal 603 - 609.
9. Short, Tom, Electric Power Distribution Handbook, CRC Press, London, 2004, Chapter 1 – 3.
10. "The Effects of Arcing", Brush Wellman Engineered Materials, Vol.4 no.11, November, 2002.
11. "The Effect of Reduced Voltage on The Operation & Efficiency of Electric System", Electric Power System Research, Vol. 1 EPRI EL 3591, Juni, 1984.

