

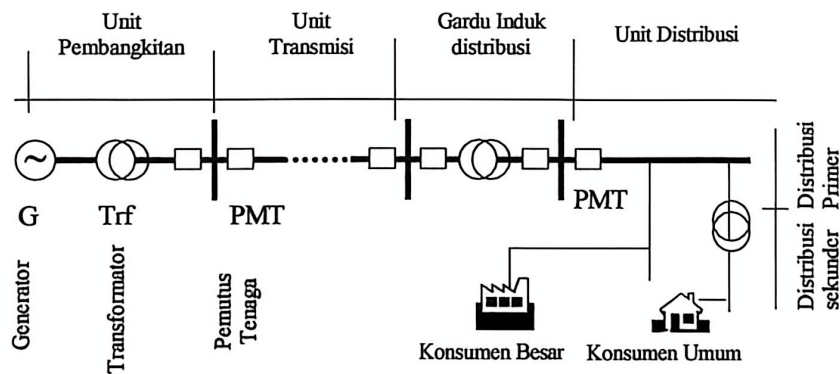
## BAB II

### SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

#### 2.1 Umum

Sistem Tenaga Listrik dikatakan sebagai kumpulan/gabungan yang terdiri dari komponen-komponen atau alat-alat listrik seperti generator, transformator, saluran transmisi, saluran distribusi dan beban yang saling berhubungan dan merupakan satu kesatuan sehingga membentuk suatu sistem.

Didalam dunia kelistrikan sering timbul persoalan persoalan teknis, dimana tenaga listrik pada umumnya dibangkitkan pada tempat-tempat tertentu yang jauh dari kumpulan pelanggan, sedangkan pemakai tenaga listrik atau pelanggan tenaga listrik tersebar disegala penjuru tempat, Dengan demikian maka penyampaian tenaga listrik dari tempat dibangkitkannya yang disebut pusat tenaga listrik sampai ke tempat pelanggan memerlukan berbagai penanganan teknis. Sistem tenaga listrik dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik[1]

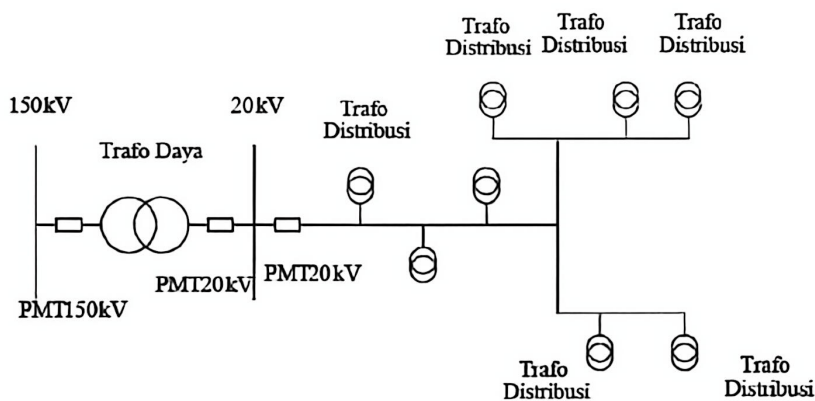
## 2.2 Jaringan Distribusi Primer

Jaringan pada sistem distribusi tegangan menengah (20kV) dapat dikelompokkan menjadi lima model, yaitu Jaringan Radial, Jaringan Hantaran Penghubung (*Tie Line*), Jaringan Lingkaran (*Loop*), Jaringan *Spindel* dan Sistem Gugus atau Kluster.

### 2.2.1 Jaringan Radial

Sistem distribusi jaringan radial seperti Gambar 2.2 adalah sistem distribusi yang paling sederhana dan ekonomis. Pada sistem ini terdapat beberapa penyulang yang menyuplai beberapa gardu distribusi secara radial.

Dalam penyulang tersebut dipasang gardu-gardu distribusi untuk konsumen. Gardu distribusi adalah tempat dimana trafo untuk konsumen dipasang, bisa dalam bangunan beton atau diletakan diatas tiang. Keuntungan dari sistem ini adalah sistem ini tidak rumit dan lebih murah dibanding dengan sistem yang lain.



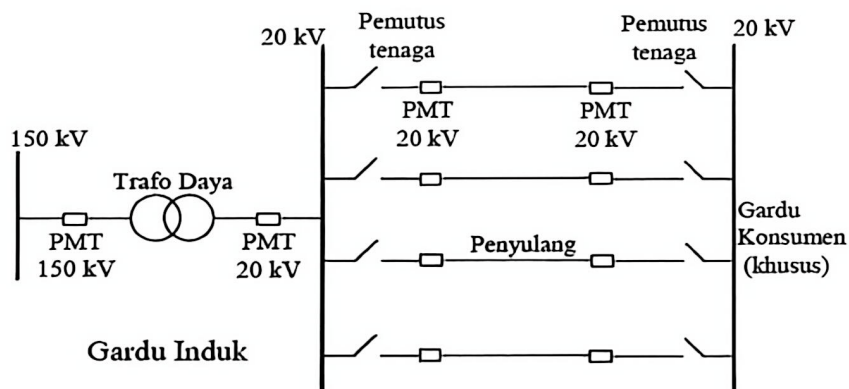
Gambar 2.2 Konfigurasi Jaringan Radial[1]

Namun keandalan sistem ini lebih rendah dibandingkan dengan sistem lainnya. Kurangnya keandalan disebabkan karena hanya terdapat satu jalur utama

yang menyuplai gardu distribusi, sehingga apabila jalur utama tersebut mengalami gangguan, maka seluruh gardu akan ikut padam. Kerugian lain yaitu mutu tegangan pada gardu distribusi yang paling ujung kurang baik, hal ini dikarenakan jatuh tegangan terbesar ada diujung saluran.

### 2.2.2 Jaringan Hantaran Penghubung (*TIE LINE*)

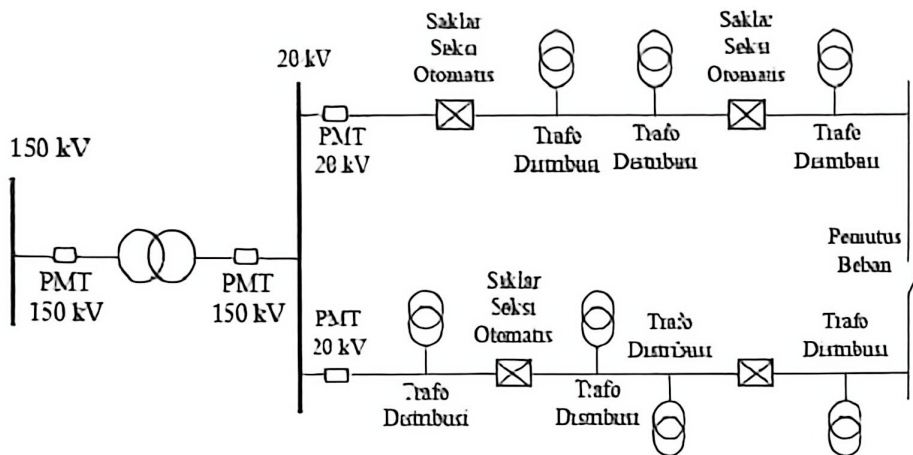
Sistem Distribusi *Tie Line* seperti Gambar 2.3 di bawah ini digunakan untuk pelanggan penting yang tidak boleh padam seperti Bandara, Rumah Sakit, dan lain-lain. Sistem ini memiliki minimal dua penyulang sekaligus dengan tambahan *Automatic Change Over Switch / Automatic Transfer Switch*. Setiap penyulang terkoneksi ke gardu pelanggan khusus tersebut sehingga bila salah satu penyulang mengalami gangguan maka pasokan listrik akan di pindah ke penyulang lain.



Gambar 2.3 Konfigurasi *Tie Line*[1]

### 2.2.3 Jaringan Lingkaran (LOOP)

Pada Jaringan Tegangan Menengah Struktur Lingkaran (*Loop*) seperti Gambar 2.4 danungkinan pemasokannya berasal dari beberapa gardu induk, sehingga dengan demikian tingkat keandalannya relatif lebih baik.



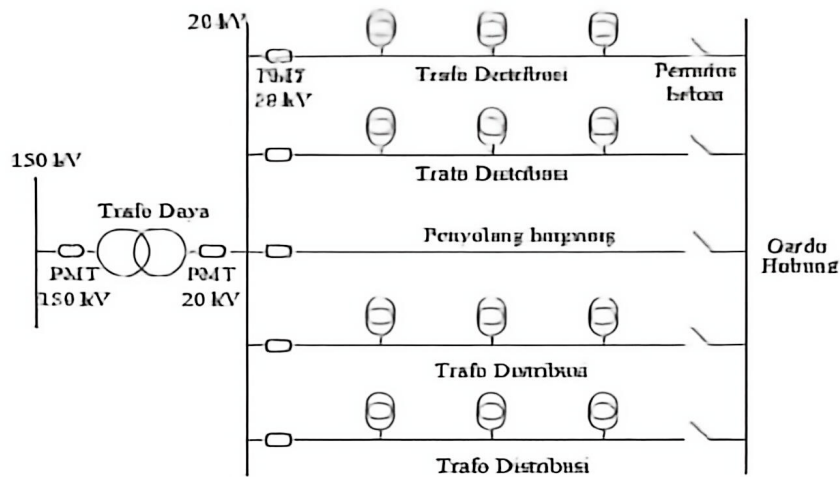
Gambar 2.4 Konfigurasi Jaringan *Loop*[1]

### 2.2.4 Jaringan Spindel

Sistem *Spindel* seperti pada Gambar 2.5 adalah suatu pola kombinasi jaringan dari pola Radial dan *Ring*. Jaringan *Spindel* terdiri dari beberapa penyulang (*feeder*) yang tegangannya diberikan dari Gardu Induk dan tegangan tersebut berakhir pada sebuah Gardu Hubung (GH).

Pada jaringan *spindel* biasanya terdiri dari beberapa penyulang aktif dan sebuah penyulang cadangan yang akan dihubungkan melalui gardu hubung. Pola *spindel* biasanya digunakan pada jaringan tegangan menengah (JTM) yang menggunakan kabel tanah/saluran kabel tanah tegangan menengah (SKTM). Namun pada pengoperasiannya, sistem *spindel* berfungsi sebagai sistem Radial. Di

dalam sebuah ponyulang aktif terdiri dari gardu distribusi yang berfungsi untuk mendistribusikan tegangan kepada konsumen baik konsumen tegangan rendah (TR) atau tegangan menengah (TM)

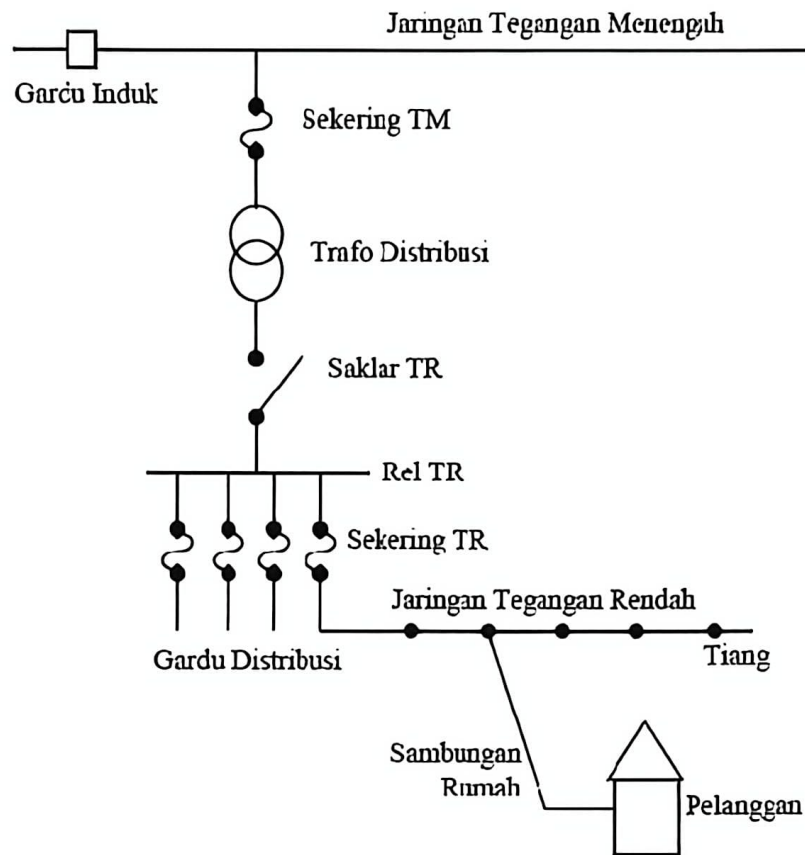


Gambar 2.5 Konfigurasi Jaringan *Spindel*[1]

### 2.2.5 Sistem Gugus (Kluster)

Konfigurasi Gugus seperti pada Gambar 2.6 di bawah ini banyak digunakan untuk kota besar yang mempunyai kerapatan beban yang tinggi. Dalam sistem ini terdapat saklar pemutus beban dan penyulang cadangan. Penyulang ini berfungsi bila ada gangguan yang terjadi pada salah satu penyulang konsumen. Artinya, penyulang cadangan inilah yang menggantikan fungsi suplai daya ke konsumen.





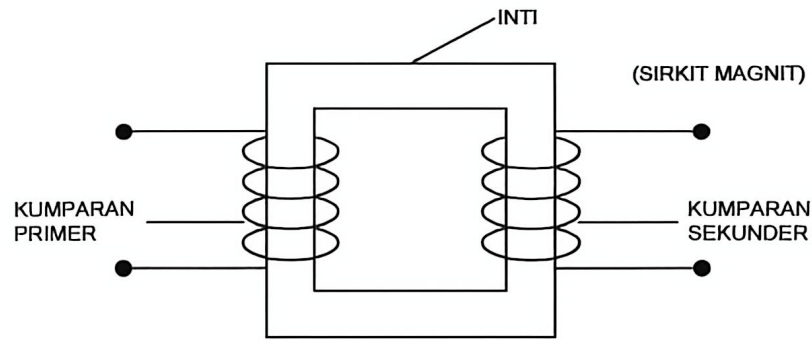
Gambar 2.7 Jaringan Distribusi Sekunder[11]

#### 2.4 Transformator

Salah satu penyebab mengapa arus AC (bolak-balik) banyak di pakai adalah karena kemungkinan mentransformasikannya amat mudah, baik dalam menaikkan tegangan maupun menurunkan tegangan. Alat yang digunakan untuk menaikkan atau menurunkan tegangan disebut transformator. Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Transformator

dapat digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun dalam bidang elektronika. Penggunaan transformator dalam bidang sistem tenaga memungkinkan terdapatnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluannya, misalnya keperluan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik untuk jarak yang jauh.

Prinsip kerja transformator dapat dilihat pada gambar 2.8 adalah berdasarkan Hukum Ampere dan Hukum Faraday, yaitu arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan sebaliknya medan magnet dapat menimbulkan arus listrik. Transformator terdiri atas dua buah kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektrik namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi (*reluctance*) rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul didalam inti yang dilaminasi. Karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks di kumparan primer maka di kumparan primer terjadi induksi (*self induction*) dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama (*mutual induction*). Inilah yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder dan mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).



Gambar 2.8 Prinsip kerja trafo[11]

#### 2.4.1 Jenis-jenis Transformator

Transformator dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis tergantung dilihat dari aspeknya.

a). Transformator berdasarkan fungsinya

Transformator *step up*, yaitu transformator yang digunakan untuk menaikkan tegangan. Transformator ini memiliki lilitan sekunder yang lebih banyak daripada lilitan primernya.

Transformator *step down*, yaitu transformator yang digunakan untuk menurunkan tegangan. Transformator ini memiliki lilitan sekunder yang lebih sedikit daripada lilitan primernya.

b). Transformator untuk pengukuran

Transformator arus, yaitu transformator digunakan untuk pengukuran arus yang besarnya ratusan ampere dari arus yang mengalir dalam jaringan tegangan tinggi. Disamping untuk pengukuran arus, trafo arus juga digunakan untuk pengukuran daya dan energi, pengukuran jarak jauh dan relay proteksi.

Transformator tegangan, yaitu transformator satu fasa *step down* yang mentransformasi tegangan tinggi atau tegangan menengah ke suatu tegangan rendah yang layak untuk perlengkapan indikator, alat ukur, relay, dan alat sinkronisasi serta berfungsi untuk merubah tegangan tinggi menjadi tegangan rendah sehingga dapat diukur dengan Voltmeter. Hal ini dilakukan atas pertimbangan harga dan bahaya yang dapat ditimbulkan tegangan tinggi.

c). Transformator berdasarkan pemakaian

- Transformator mesin, yaitu transformator yang digunakan pada mesin-mesin listrik.
- Transformator Gardu Induk, yaitu digunakan pada gardu induk.
- Transformator distribusi, yaitu transformator yang digunakan pada saluran distribusi untuk menyalurkan energy listrik ke konsumen.

#### 2.4.2 Rugi-rugi Transformator

Transformator memiliki beberapa rugi-rugi sebagai berikut :

a). Rugi-rugi Tembaga ( $P_{cu}$ )

Rugi-rugi tembaga merupakan rugi-rugi yang diakibatkan oleh adanya tahanan resistif yang dimiliki oleh tembaga yang digunakan pada bagian lilitan trafo, baik pada bagian primer maupun sekunder.

$$P_{cu} = I^2R \text{ (watt)} \quad (2.1)$$

Formula ini merupakan perhitungan untuk pendekatan. Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak konstan bergantung pada beban. Dan perlu diperhatikan pula resistansi disini merupakan resistansi AC.

b). Rugi Besi ( $P_i$ )

Rugi besi di peroleh dari percobaan beban nol dari suatu transformator.

Dari percobaan, dapat diketahui bahwa arus penguat  $I_0$  terdiri dari 2 komponen, yaitu komponen arus pemagnetan ( $I_m$ ) dan komponen rugi inti dari arus penguat  $I_c$ , yang menyatakan arus yang terpakai akibat adanya arus hysteresis dan arus Eddy. Besar rugi besi adalah penjumlahan dari rugi hysteresis dengan rugi Eddy.

#### 1). Rugi-rugi Eddy Current ( $P_e$ )

Rugi-rugi arus eddy merupakan rugi-rugi panas yang terjadi pada bagian inti trafo. Perubahan fluks menyebabkan induksi tegangan pada bagian inti besi trafo dengan cara yang sama seperti pada kawat yang mengelilinginya. Tegangan tersebut menyebabkan arus berputar pada bagian inti trafo. Arus eddy akan mengalir pada bagian inti trafo yang bersifat resistif. Arus eddy akan mendisipasikan energi ke dalam inti besi trafo yang kemudian akan menimbulkan panas.

#### 2). Rugi-rugi Hysteresis ( $P_h$ )

Rugi-rugi hysteresis merupakan rugi-rugi yang berhubungan dengan pengaturan daerah energi pada bagian inti trafo. Dalam pengaturan daerah magnetic tersebut dibutuhkan energi. Akibatnya akan menimbulkan rugi-rugi terhadap daya yang melalui trafo. Rugi-rugi tersebut menimbulkan panas pada bagian inti trafo.

### **2.5 Transformator Distribusi**

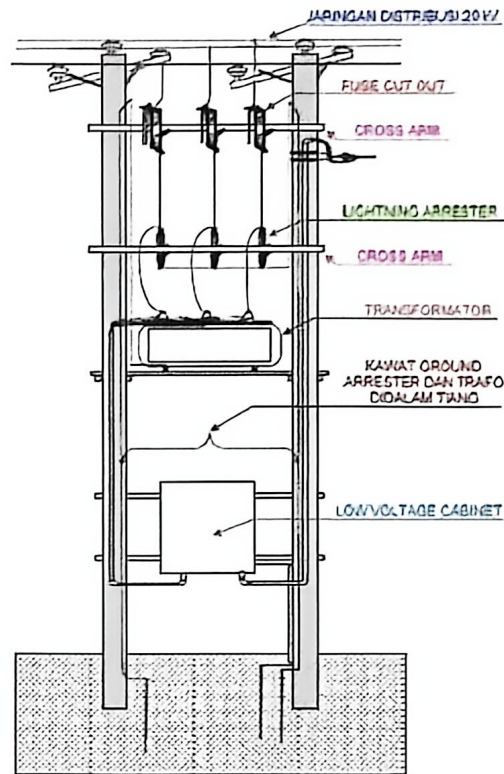
Transformator distribusi adalah seperangkat peralatan statis yang berdasarkan prinsip elektromagnetik mentransformasikan tegangan dan arus bolak-balik diantara dua belitan atau lebih pada frekuensi yang sama dan pada nilai arus dan tegangan yang berbeda.

Transformator juga berfungsi untuk menaikkan dan menurunkan tegangan, sedangkan transformator distribusi sendiri berfungsi sebagai transformator daya yang menurunkan/merubah tegangan menengah (70/20kV) menjadi tegangan rendah (380/220Volt). Turun dan naiknya tegangan pada sisi sekunder bergantung pada perbandingan jumlah lilitan kumparan.

Gardu trafo distribusi berlokasi dekat dengan konsumen. Transformator dipasang pada tiang listrik dan menyatu dengan jaringan listrik. Untuk mengamankan transformator dan sistemnya, gardu dilengkapi dengan unit-unit pengaman. Karena tegangan yang masih tinggi belum dapat digunakan untuk mencatu beban secara langsung, kecuali pada beban yang didisain khusus, maka digunakan transformator penurun tegangan (*step down*) yang berfungsi untuk menurunkan tegangan menengah 20 kV ke tegangan rendah 400/230 Volt. Kontruksi gardu transformator distribusi dapat dilihat pada gambar 2.9.

Gardu trafo distribusi ini terdiri dari dua sisi, yaitu sisi primer dan sisi sekunder. Sisi primer merupakan saluran yang akan mensuplay ke bagian sisi sekunder. Unit peralatan yang termasuk sisi primer adalah:

- a). Saluran sambungan dari SUTM ke unit transformator (primer trafo)
- b). *Fuse cut out*
- c). *Ligthning arrester*



Gambar 2.9 Gardu Transformator Distribusi[1]

## 2.6 Susut Energi

Saluran Distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Saluran distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber Gardu Induk sampai ke konsumen. Dalam penyalurannya energi yang sampai ke konsumen tidak akan sama dengan energi yang dikirimkan. Hal ini dikarenakan timbulnya susut energi sepanjang saluran distribusi. Susut energi merupakan kerugian energi akibat beberapa masalah. Pada umumnya disebabkan oleh kualitas daya hantar listrik. Semakin bagus kualitas daya hantar listrik semakin rendah susut yang terjadi. Selain itu ada juga yang diakibatkan oleh rusaknya instalasi di jaringan maupun dalam rumah yang tidak standar, akibat pencurian, maupun menggunakan peralatan yang tidak sesuai. Seiring pesatnya pertumbuhan beban, susut teknis yang

disebabkan oleh adanya resistansi pada penghantar akan semakin meningkat seiring dengan besarnya beban akan menyebabkan kenaikan susut daya yang signifikan. Hal ini dikarenakan susut berbanding lurus dengan resistansi penghantar dan kuadrat arus beban. Pada sistem 3 fasa dimana jaringan tegangan rendahnya menggunakan penghantar netral, susut pada jaringan tegangan rendah akan semakin bertambah dengan adanya kontribusi susut penghantar netral. Bahkan pada pembebanan sistem yang tidak seimbang besarnya arus yang mengalir pada penghantar fasa (resistansi lebih besar) akan berkontribusi susut teknis yang juga lebih besar.

Salah satu cara menurunkan untuk susut teknis pada jaringan tegangan rendah adalah dengan melakukan pemecahan beban dan pemerataan beban. Pemecahan beban bertujuan untuk mengurangi arus beban yang mengalir pada penghantar fasa dengan cara membangun gardu portal atau memindahkan bebanan jurusan yang terbebani berat ke jurusan yang pembebanannya ringan. Sementara pemerataan beban bertujuan untuk mengurangi besar arus yang mengalir pada penghantar netral sehingga diharapkan susut teknis jaringan tegangan rendah akibat pembebanan atau ketidakseimbangan dapat dikurangi.

#### **2.6.1 Susut Energi Ditinjau dari Tempat Terjadinya**

Berdasarkan tempat terjadinya, susut energi dibagi menjadi 2 bagian yaitu susut transmisi dan susut distribusi.

1. Susut Transmisi, yaitu hilangnya energi listrik yang di bangkitkan pada saat disalurkan melalui jaringan transmisi ke gardu induk.
2. Susut Distribusi, yaitu hilangnya energi listrik yang didistribusikan dari gardu induk melalui jaringan distribusi ke pelanggan.

### **2.6.2 Susut Energi Ditinjau dari Sisi Sifatnya**

Berdasarkan sifatnya, susut energi dibagi menjadi 2 bagian yaitu susut konstan dan susut variabel.

1. Susut konstan, yaitu susut yang timbul secara konstan (terus-menerus) pada sistem distribusi tenaga listrik yang tidak dipengaruhi oleh fluktuasi beban (sepanjang sumber tegangan masih ada). Contoh susut konstan yaitu rugi-rugi besi trafo, rugi-rugi pada kWh meter, kebocoran isolasi dan sebagainya.
2. Susut variabel, yaitu susut yang timbul secara variabel (berubah-ubah) pada sistem distribusi tenaga listrik yang dipengaruhi oleh fluktuasi beban (naik-turunnya beban). Contoh susut variabel yaitu rugi-rugi penghantar ( $I^2R$ ), rugi-rugi pada titik sambung/titik kontak, dan sebagainya.

### **2.6.3 Susut Energi Ditinjau dari Sisi Penyebabnya**

Berdasarkan penyebabnya, susut energi dibagi menjadi 2 bagian yaitu susut teknis dan susut nonteknis.

1. Susut teknis, yaitu susut yang timbul pada sistem distribusi tenaga listrik yang disebabkan oleh faktor teknis yang sangat dipengaruhi oleh fluktuasi dan sifat beban, antara lain seperti ukuran konduktor, panjang jaringan, sistem tegangan yang dipakai, tingkat isolasi yang ada, dan lain sebagainya (berkaitan langsung dengan  $I^2R$ )
2. Susut nonteknis, yaitu susut yang timbul pada sistem distribusi tenaga listrik yang disebabkan oleh faktor nonteknis, antara lain seperti kesalahan administrasi data pelanggan, kesalahan dalam pembacaan dan pencatatan meter listrik, adanya kasus pelanggaran (pencurian listrik) dan lain sebagainya.

## 2.7 Penyebab Terjadinya Susut Energi

Penyebab terjadinya susut energi bisa ditinjau dari 2 segi, yaitu: dari segi teknis dan dari segi non teknis. Dari segi teknis, yang menjadi penyebab susut energi adalah sebagai berikut:

1. Ukuran penghantar yang kurang optimum (yang dipengaruhi oleh Faktor Beban dan Faktor Distribusi Beban).
2. Jaringan yang terlalu panjang.
3. Tingkat isolasi yang telah menurun dibawah batas minimal (pada isolator, minyak trafo, kabel, arrester).
4. Pembebanan yang tidak seimbang (timbulnya  $I_0$ ).
5. Faktor Daya ( $\cos \theta$ ) yang rendah (timbulnya daya reaktif).
6. Ketidak akuratan dari alat ukur meter kWh, *Current Transformers*, maupun *Potential Transformers* (timbulnya selisih hasil ukur).
7. Titik sambung / kontak yang kurang sempurna (timbulnya panas yang berlebihan sehingga mengurangi energi).
8. Pengawatan alat ukur yang salah pada urutan fasa/polaritas (timbulnya selisih ukur).
9. Pengaruh harmonisa (*Power Quality*) sehingga mempengaruhi pengukuran
10. Kebocoran arus melalui pepohonan atau sisa benang layang-layang yang menyentuh jaringan (timbulnya kebocoran energi).

Sedangkan dari segi non teknis yang menjadi penyebab susut energi adalah sebagai berikut:

1. Data Induk Langgan (DIL) yang tidak akurat.
2. Pembacaan/pencatatan angka stand kWh meter yang tidak tepat/benar (waktu, angka, penafsiran, faktor kali dan lain-lain).

3. Pencurian aliran listrik oleh pelanggan maupun non pelanggan.
4. Pemakaian sendiri yang tidak terukur / tercatat.
5. Cara perhitungan yang tidak benar.

## **2.8 Susut Teknis Pada Jaringan Distribusi**

Susut teknis adalah merupakan susut yang disebabkan oleh sifat daya hantaran material atau peralatan listrik itu sendiri yang sangat tergantung dari kualitas bahan dari material atau peralatan listrik tersebut serta jaringan, maka besarnya akan sangat tergantung dari konfigurasi jaringannya. Susut yang menjadi perhatian dalam studi ini adalah rugi-rugi energi yang timbul pada jaringan tegangan menengah (JTM) yaitu, susut pada penghantar fasa dan susut pada penghantar netral.

Susut daya dipengaruhi oleh dua hal penting yaitu arus beban dan tahanan penghantar. Arus beban sangat dipengaruhi oleh dua pola konsumsi energi listrik pelanggan. Pada pelanggan perumahan flukstuansi konsumsi energi listrik sangat besar dengan perbedaan yang signifikan antara konsumsi energi listrik pada siang hari dan malam hari, sedangkan pada sektor industri flukstuansi konsumsi energy sepanjang hari akan hampir sama, sehingga perbandingan beban puncak terhadap beban rata-rata hampir mendekati 1 (satu).

Pada sistem tiga fasa yang memiliki penghantar netral, susut pada jaringan menjadi susut pada penghantar fasa dan susut pada penghantar netral. Pada kondisi pembebanan seimbang arus netral yang merupakan penjumlahan vector masing-masing arus fasanya akan berharga nol. Sedangkan pada kondisipembebanan tidak seimbang arus yang mengalir pada penghantar netral dapatberharga sama dengan arus yang mengalir pada penghantar fasa. Dengan diameter yang lebih kecil atau

resistansi yang lebih besar dibandingkan dengan resistansi fasanya, susut penghantar netral akan menjadi lebih besar dari susut pada penghantar fasanya.

Faktor lain yang mempengaruhi susut pada jaringan tegangan rendah adalah panjang jaringan tegangan rendah dan luas penampang konduktornya, dimana semakin panjang jaringan dengan penampang konduktor yang lebih kecil, maka susut pada jaringan akan semakin besar.