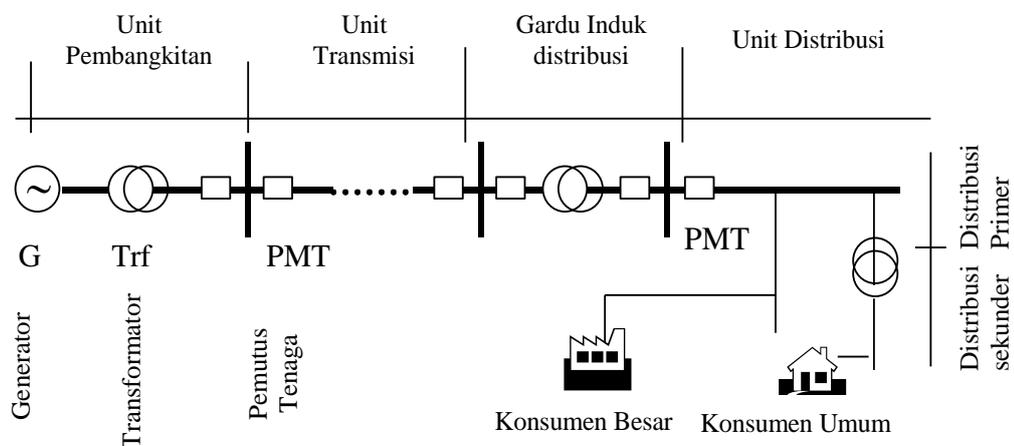


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Secara garis besar, suatu sistem tenaga listrik yang lengkap mengandung empat unsur. Pertama, adanya suatu unsur pembangkit tenaga listrik. Tegangan yang dihasilkan oleh pusat tenaga listrik ini biasanya merupakan tegangan menengah. Kedua, suatu sistem transmisi, lengkap dengan gardu induk. Karena jaraknya yang biasanya jauh, maka diperlukan penggunaan Tegangan Tinggi (TT) dan/atau Tegangan Ekstra Tinggi (TET). Ketiga, adanya saluran distribusi, yang biasanya terdiri atas saluran distribusi primer dengan Tegangan Menengah (TM) dan saluran distribusi sekunder dengan Tegangan Rendah (TR). Keempat, adanya unsur pemakaian atau utilisasi, yang terdiri atas instalasi pemakaian tenaga listrik. Instalasi rumah tangga biasanya memakai tegangan rendah, sedangkan pemakai besar seperti industri menggunakan tegangan menengah atau tegangan tinggi. Gambar 2.1 memperlihatkan skema suatu sistem tenaga listrik. Perlu dikemukakan bahwa suatu sistem dapat terdiri atas beberapa subsistem yang saling berhubungan, atau yang biasa disebut sebagai sistem terinterkoneksi. Sebagaimana diketahui, pada sistem distribusi terdapat dua bagian, yaitu distribusi primer, yang menggunakan tegangan menengah, dan distribusi sekunder, yang menggunakan tegangan rendah.<sup>[3]</sup>



Gambar 2.1 Skema Sistem Tenaga Listrik



### 2.1.1 Distribusi Primer

Sistem jaringan distribusi primer atau sering disebut jaringan distribusi tegangan tinggi ini terletak antara gardu induk dengan gardu pembagi, yang memiliki tegangan sistem lebih tinggi dari tegangan terpakai untuk konsumen. Standar tegangan untuk jaringan distribusi primer ini adalah 12 dan 20 kV (sesuai standar PLN).<sup>[7]</sup>

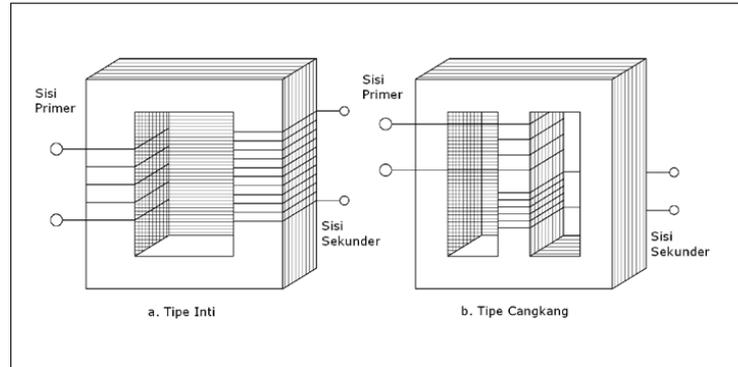
### 2.1.2 Distribusi Sekunder

Sistem jaringan distribusi sekunder atau sering disebut jaringan distribusi tegangan rendah (JDTR), merupakan jaringan yang berfungsi sebagai penyalur tenaga listrik dari gardu-gardu pembagi (gardu distribusi) ke pusat-pusat beban (konsumen tenaga listrik). Besarnya standar tegangan untuk jaringan distribusi sekunder ini adalah 127/220 V untuk sistem lama, dan 220/380 V untuk sistem baru, serta 440/550 V untuk keperluan industri. Besarnya tegangan maksimum yang diizinkan adalah 3 sampai 4 % lebih besar dari tegangan nominalnya. Penetapan ini sebanding dengan besarnya nilai tegangan jatuh (voltage drop) yang telah ditetapkan berdasarkan PUIL 661 F.1, bahwa rugi-rugi daya pada suatu jaringan adalah 15 %. Dengan adanya pembatasan tersebut stabilitas penyaluran daya ke pusat-pusat beban tidak terganggu.<sup>[7]</sup>

## 2.2 Transformator

Transformator (trafo) merupakan suatu alat magnetoelektrik yang sederhana, handal, dan efisien untuk mengubah tegangan arus bolak-balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain. Pada umumnya terdiri atas sebuah inti yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Rasio perubahan tegangan akan tergantung dari rasio jumlah lilitan pada kedua kumparan itu. Biasanya kumparan terbuat dari kawat tembaga yang dibelit seputar 'kaki' inti transformator. Secara umum dapat dibedakan dua jenis transformator menurut konstruksinya, yaitu tipe inti dan tipe cangkang. Pada tipe inti terdapat dua kaki, dan masing-masing kaki dibelit oleh satu kumparan. Sedangkan tipe cangkang mempunyai tiga buah kaki, dan hanya kaki yang tengah-tengah dibelit oleh kedua kumparan. Kedua kumparan dalam tipe

cangkang ini tidak tergabung secara elektrik, melainkan saling tergabung secara magnetik melalui inti. Bagian datar dari inti dinamakan ‘pemikul’. [4]



Gambar 2.2 Jenis Transformator Menurut Konstruksinya

### 2.2.1. Hubungan Lilitan Transformator

Secara umum dikenal tiga macam hubungan lilitan untuk sebuah transformator tiga fasa, yaitu : hubungan bintang, hubungan delta, dan hubungan zig – zag. [8]

#### 2.2.1.1 Hubungan Bintang

Arus transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara bintang yaitu,  $I_A$ ,  $I_B$ , dan  $I_C$ , masing – masing berbeda fasa  $120^\circ$ .

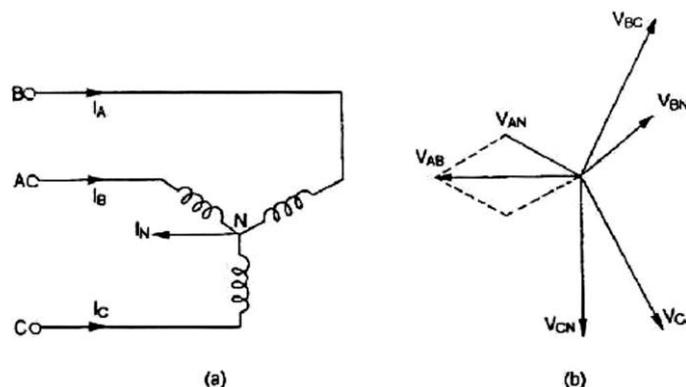
Untuk beban yang seimbang :

$$I_N = I_A + I_B + I_C = 0 \dots\dots\dots 2.1$$

$$V_{AB} + V_{AN} + V_{BN} = V_{AN} - V_{BN} \dots\dots\dots 2.2$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} \dots\dots\dots 2.3$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} \dots\dots\dots 2.4$$



Gambar 2.3 Rangkaian hubungan bintang [8]



Dari vektor diagram diketahui bahwa untuk hubungan bintang berlaku hubungan :

$$V_{AB} = \sqrt{3}V_{AN} \text{ atau } V_L = \sqrt{3}V_P \dots\dots\dots 2.5$$

$$I_P = I_L \dots\dots\dots 2.6$$

Jadi besarnya daya pada hubungan bintang (VA)

$$= 3 V_P I_P \dots\dots\dots 2.7$$

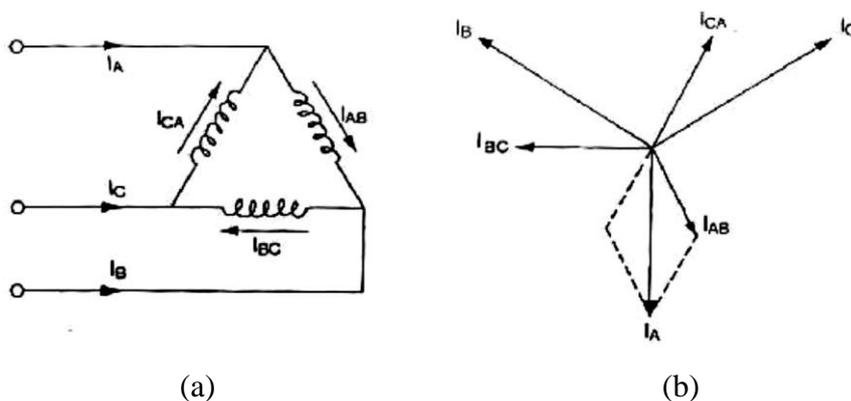
$$= 3 (V_L / \sqrt{3}) I_L \dots\dots\dots 2.8$$

$$= \sqrt{3} V_L I_L \dots\dots\dots 2.9$$

2.2.1.2 Hubungan Delta

Tegangan transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara delta, yaitu  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  dan  $V_{CA}$ , masing – masing berbeda fasa  $120^\circ$ .

$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0$$



Gambar 2.4 Rangkaian hubungan delta<sup>[8]</sup>

Untuk beban yang seimbang

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} \dots\dots\dots 2.10$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB} \dots\dots\dots 2.11$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC} \dots\dots\dots 2.12$$

Dari vektor diagram diketahui arus  $I_A$  (arus jala – jala) adalah  $\sqrt{3}$  x  $I_{AB}$  (arus fasa).

Tegangan jala – jala dalam hubungan delta sama dengan tegangan phasanya.

V.A. hubungan delta

$$= V_P I_P \dots\dots\dots 2.13$$

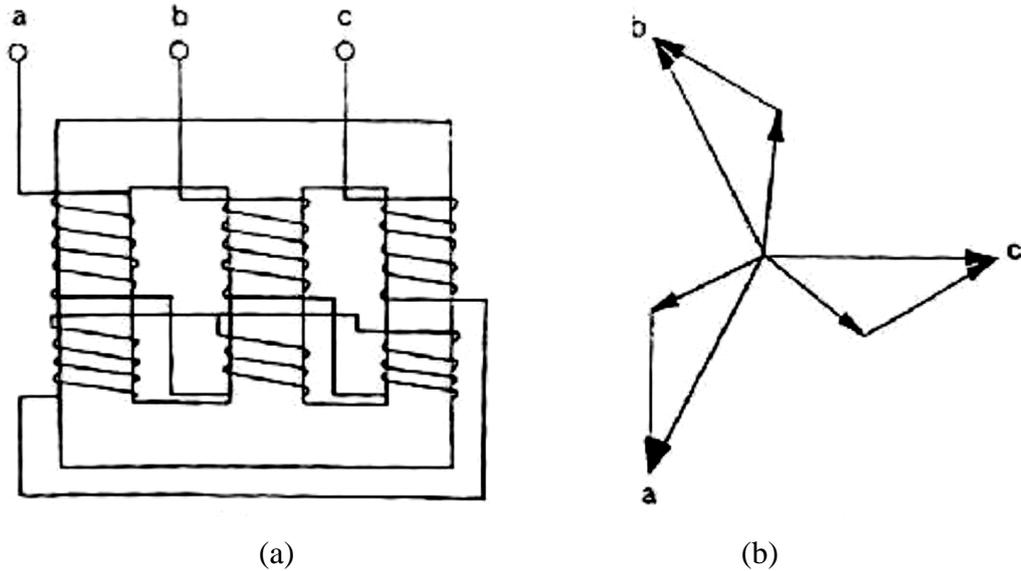
$$= 3V_L \left( \frac{I_L}{\sqrt{3}} \right) \dots\dots\dots 2.14$$

$$= \sqrt{3}V_L I_L \dots\dots\dots 2.15$$



2.2.1.3 Hubungan Zig – Zag

Masing–masing lilitan tiga fasa pada sisi tegangan rendah dibagi menjadi dua bagian dan masing–masing dihubungkan pada kaki yang berlainan. <sup>[8]</sup>



Gambar 2.5 Rangkaian hubungan zig-zag<sup>[8]</sup>

Perhatikan gambar a dan b. Hubungan silang atau zig – zag digunakan untuk keperluan khusus seperti pada transformator distribusi dan transformator converter. <sup>[8]</sup>

2.2.2 Transformator Distribusi

Transformator distribusi merupakan salah satu alat yang memegang peran penting dalam sistem distribusi. Trafo distribusi digunakan untuk membagi/menzalurkan arus atau energi listrik dengan tegangan distribusi agar jumlah energi yang tersecer dan hilang di perjalanan tidak terlalu banyak<sup>[5]</sup>

Trafo distribusi dapat berfasa tunggal atau fasa tiga, dan ukurannya berkisar dari kira-kira 5 – 500 kVA. Impedansi trafo distribusi ini pada umumnya sangat rendah, berkisar dari 2% untuk unit-unit yang kurang dari 50 kVA sampai dengan 4% untuk unit-unit yang lebih besar dari 100 kVA. <sup>[5]</sup>

Telah diketahui bahwa daya transformator distribusi ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$S = \sqrt{3} V I \dots\dots\dots 2.16$$

Dimana :



S : daya transformator (kVA)

V : tegangan sisi primer transformator (kV)

I : arus jala-jala (A) <sup>[8]</sup>

Dengan demikian, untuk menghitung arus beban penuh (full load) dapat menggunakan rumus :

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3}V} \dots\dots\dots 2.17$$

Dimana :

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

S : daya transformator (kVA)

V : tegangan sisi sekunder transformator (kV) <sup>[8]</sup>

Sedangkan untuk menghitung arus hubung singkat pada transformator digunakan rumus :

$$I_{SC} = \frac{S.100}{\%Z.\sqrt{3}.V} \dots\dots\dots 2.18$$

Dimana :

$I_{SC}$  : arus hubung singkat (A)

S : daya transformator (kVA)

V : tegangan sisi sekunder transformator (kV)

%Z : persen impedansi transformator <sup>[8]</sup>

Dengan demikian untuk menghitung persentase pembebanannya adalah sebagai berikut :

$$\%b = \frac{I_{ph}}{I_{FL}} \times 100\% \dots\dots\dots 2.19$$

% b : Persentase Pembebanan (%)

$I_{ph}$  : Arus Fasa (A)

$I_{FL}$  : Arus Beban Penuh (A) <sup>[1]</sup>



### 2.3 Beban Listrik

Menurut sifatnya, beban listrik terdiri dari :

- a. Resistor (R) yang bersifat resistif
- b. Induktor (L) yang bersifat induktif
- c. Capacitor (C) yang bersifat kapasitif

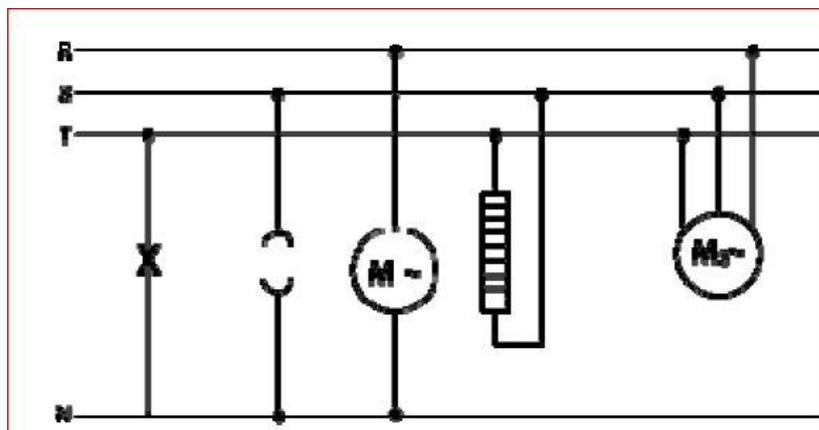
Beban listrik adalah piranti /peralatan yang menggunakan / mengkonsumsi energi listrik. Jenis beban listrik yang akan di bahas secara garis besar adalah sebagai berikut :

- Untuk penerangan dengan lampu-lampu pijar, pemanas listrik yang bersifat resistif.
- Untuk peralatan yang menggunakan motor-motor listrik (pompa air, alat pendingin/AC/Freezer/kulkas, peralatan laboratorium), penerangan dengan lampu tabung yang menggunakan balast/trafo bersifat induktif (lampu TL, sodium, merkuri, komputer, TV, dll).

Jika beban resistif diaktifkan (dinyalakan), maka arus listrik pada beban ini segera mengalir dengan cepatnya sampai pada nilai tertentu (sebesar nilai arus nominal beban) dan dengan nilai yang tetap hingga tidak diaktifkan (dimatikan).

[6]

Lain halnya dengan beban induktif, misalnya pada motor listrik. Begitu motor diaktifkan (digerakkan), maka saat awal (start) menarik arus listrik yang besar (3 sampai 5 kali nilai arus nominal), kemudian turun kembali ke arus nominal. [6]



Gambar 2.6 Macam-macam Beban Listrik<sup>[6]</sup>



### 2.3.1 Klasifikasi Beban Listrik

Secara umum beban yang dilayani oleh sistem distribusi listrik ini dibagi dalam beberapa sektor yaitu sektor perumahan, sektor industri, sektor komersial dan sektor usaha. Masing-masing sektor beban tersebut mempunyai karakteristik-karakteristik yang berbeda, sebab hal ini berkaitan dengan pola konsumsi energi pada masing-masing konsumen di sektor tersebut. Karakteristik beban yang banyak disebut dengan pola pembebanan pada sektor perumahan ditunjukkan oleh adanya fluktuasi konsumsi energi elektrik yang cukup besar. Hal ini disebabkan konsumsi energi elektrik tersebut dominan pada malam hari.<sup>[7]</sup>

Sedang pada sektor industri fluktuasi konsumsi energi sepanjang hari akan hampir sama, sehingga perbandingan beban puncak terhadap beban rata-rata hampir mendekati satu. Beban pada sektor komersial dan usaha mempunyai karakteristik yang hampir sama, hanya pada sektor komersial akan mempunyai beban puncak yang lebih tinggi pada malam hari.<sup>[7]</sup>

Berdasarkan jenis konsumen energi listrik, secara garis besar, ragam beban dapat diklasifikasikan ke dalam :

a. Beban rumah tangga, pada umumnya beban rumah tangga berupa lampu untuk penerangan, alat rumah tangga, seperti kipas angin, pemanas air, lemari es, penyejuk udara, mixer, oven, motor pompa air dan sebagainya. Beban rumah tangga biasanya memuncak pada malam hari.

b. Beban komersial, pada umumnya terdiri atas penerangan untuk reklame, kipas angin, penyejuk udara dan alat – alat listrik lainnya yang diperlukan untuk restoran. Beban hotel juga diklasifikasikan sebagai beban komersial (bisnis) begitu juga perkantoran. Beban ini secara drastis naik di siang hari untuk beban perkantoran dan pertokoan dan menurun di waktu sore.

c. Beban industry, dibedakan dalam skala kecil dan skala besar. Untuk skala kecil banyak beroperasi di siang hari sedangkan industri besar sekarang ini banyak yang beroperasi sampai 24 jam.

d. Beban fasilitas umum, merupakan beban untuk pelayanan umum seperti penerangan jalan, taman dan lainnya. Penerangan jalan umum dalam jumlah besar akan berdampak pada konsumsi daya listrik.



e. Beban lain – lain, merupakan kumpulan beban – beban yang belum bias dimasukkan dalam kelompok beban tersebut.

Pengklasifikasian ini sangat penting artinya bila kita melakukan analisa beban untuk suatu sistem yang sangat besar. Perbedaan yang paling prinsip dari empat jenis beban diatas, selain dari daya yang digunakan dan juga waktu pembebanannya. Pemakaian daya pada beban rumah tangga akan lebih dominan pada pagi dan malam hari, sedangkan pada beban komersil lebih dominan pada siang dan sore hari. Pemakaian daya pada industri akan lebih merata, karena banyak industry yang bekerja siang-malam. Maka dilihat dari sini, jelas pemakaian daya pada industri akan lebih menguntungkan karena kurva bebannya akan lebih merata. Sedangkan pada beban fasilitas umum lebih dominan pada siang dan malam hari. <sup>[7]</sup>

### 2.3.2 Karakteristik Umum Beban Listrik

Karakteristik beban diperlukan agar sistem tegangan dan pengaruh thermis dari pembebanan dapat dianalisis dengan baik. Analisis tersebut termasuk dalam menentukan keadaan awal yang akan di proyeksikan dalam perencanaan selanjutnya. Penentuan karakteristik beban listrik suatu gardu distribusi sangat penting artinya untuk mengevaluasi pembebanan gardu distribusi tersebut, ataupun dalam merencanakan suatu gardu distribusi yang baru. Karakteristik beban ini sangat memegang peranan penting dalam memilih kapasitas transformator secara tepat dan ekonomis. Di lain pihak sangat penting artinya dalam menentukan rating peralatan pemutus rangkaian, analisa rugi-rugi dan menentukan kapasitas pembebanan dan cadangan tersedia dan suatu gardu. Karakteristik beban listrik suatu gardu sangat tergantung pada jenis beban yang dilayaninya. Hal ini akan jelas terlihat dan hasil pencatatan kurva beban suatu interval waktu. Berikut ini beberapa faktor yang menentukan karakteristik beban. <sup>[7]</sup>

- Faktor Beban (load factor)
- Beban Harian
- Faktor Beban harian rata – rata
- Faktor Penilaian Beban
- Jenis Beban Tersambung

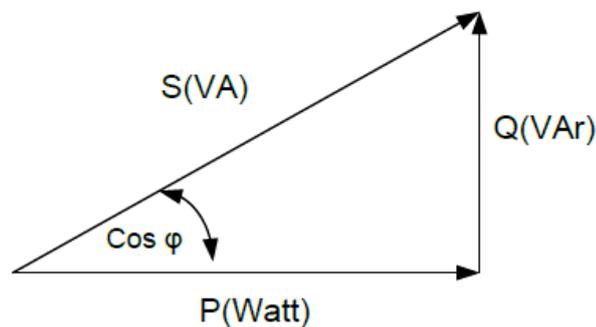


- Beban Penerangan
- Beban Tenaga
- Faktor Diversitas
- Faktor Kebersamaan (waktu)
- Kebutuhan “Demand”
- Selang Kebutuhan “Demand Interval”
- Kebutuhan Maksimum “Maksimum Demand”
- Diversitas Kebutuhan “Diseverisfied Demand”
- Faktor Kebutuhan (DF = demand factor)
- Faktor Coincident (CF = coincident factor)
- Faktor Rugi-rugi Beban (LLF = Loss factor)
- Faktor Penggunaan (UF = utility factor)

#### 2.4 Faktor Daya

Pengertian faktor daya ( $\cos \phi$ ) adalah perbandingan antara daya aktif (P) dan daya semu (S). Dari pengertian tersebut, faktor daya tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut<sup>[1]</sup> :

$$\begin{aligned}
 \text{Faktor daya} &= (\text{Daya Aktif} / \text{Daya Semu}) \\
 &= (P / S) \\
 &= (V.I. \cos \phi / V.I) \\
 &= \cos \phi
 \end{aligned}$$



Gambar 2.7 Segitiga Daya

Daya Semu	= V.I (VA)	.....2.20
Daya Aktif	= V.I Cos $\phi$ (Watt)	.....2.21
Daya Reaktif	= V.I Sin $\phi$ (VAr)	.....2.22



## 2.5 Ketidakseimbangan Beban

### 2.5.1 Pengertian tentang Beban Tidak Seimbang

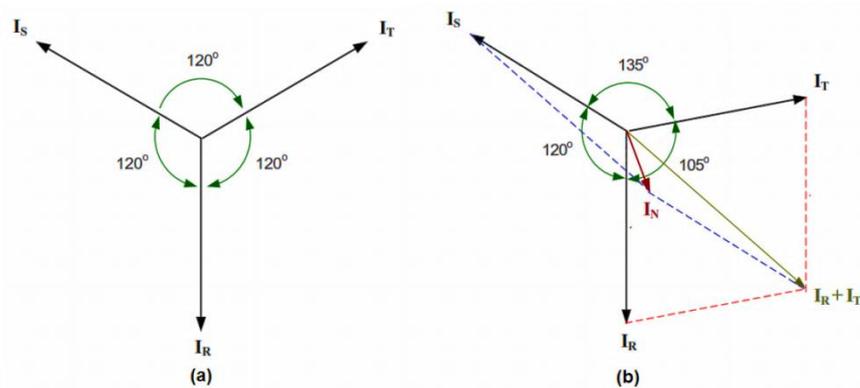
Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana :

- Ketiga vektor/tegangan sama besar
- Ketiga vektor saling membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.<sup>[1]</sup>

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan tidak seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3 macam, yaitu :

- Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain
- Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain
- Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.<sup>[1]</sup>

Untuk lebih jelasnya dapat digambarkan dengan vektor diagram arus pada gambar 2.14.



Gambar 2.8 (a) Vektor Diagram Arus dalam keadaan seimbang dan  
(b) Vektor diagram arus yang tidak seimbang<sup>[1]</sup>

Gambar 2.8 (a) menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya ( $I_R, I_S,$  dan  $I_T$ ) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral ( $I_N$ ). Sedangkan pada



Gambar 2.8 (b) menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya ( $I_R, I_S,$  dan  $I_T$ ) tidak sama dengan nol, sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral ( $I_N$ ) yang besarnya tergantung dari berapa besar faktor ketidakseimbangannya.<sup>[1]</sup>

Pada dasarnya, ada 3 sumber penyebab terjadinya ketidakseimbangan sistem 3 fasa ini, yaitu :

Tidak seimbang tegangan sejak pada sumbernya:

Tegangan tak simetris pada output generator 3 fasa bisa saja terjadi (walaupun jarang) karena kesalahan teknis pada ketiga berkas kumparan dayanya (jumlah lilitan atau resistansi).<sup>[5]</sup>

Tidak seimbang tegangan pada salurannya:

Hal demikian dapat disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain:

- a) Konfigurasi ketiga saluran secara total tidak seimbang, sehingga total kapasitansinya tidak seimbang. Keadaan demikian dapat terjadi pada penyaluran jarak jauh dan bertegangan tinggi, dimana jarak rata-rata masing-masing saluran fasa terhadap tanah tidak sama.
- b) Resistansi saluran tidak sama karena jenis bahan konduktor yang berbeda
- c) Resistansi saluran tidak sama karena ukuran konduktor tidak sama (besar R dipengaruhi oleh besar q).
- d) Resistansi saluran tidak sama karena jarak antara masing-masing 1 saluran fasa dengan beban tidak sama (besar R dipengaruhi oleh jarak  $l$ ).<sup>[5]</sup>

Tidak seimbang karena pembebanannya:

Karena besar I (arus beban) ditentukan oleh besar R (beban), maka pada keadaan 3 $\phi$ :  $R_R \neq R_S \neq R_T$ , maka arus bebannya:  $I_R \neq I_S \neq I_T$ . Akibat lanjutnya adalah : bila resistansi saluran dianggap sama dengan R, maka rugi tegangan yang terjadi pada sistem 3 $\phi$  adalah  $I_R R \neq I_S R \neq I_T R$  atau  $V_R \neq V_S \neq V_T$  dan rugi daya  $I_R^2 R \neq I_S^2 R \neq I_T^2 R$  atau  $P_R \neq P_S \neq P_T$  sehingga:  $V_{(T)R} \neq V_{(T)S} \neq V_{(T)T}$  dimana  $V_{(T)}$  = tegangan pada sisi terima (konsumen). Kondisi tak seimbang pada tegangan sisi terima akibat tidak seimbang beban ini adalah suatu hal yang paling sering



terjadi dalam praktek, antara lain oleh adanya sambungan-sambungan di luar perhitungan dan perencanaan. Upaya teknis memang perlu dilakukan, agar diperoleh keadaan pembebanan yang seimbang. Pada sistem 3 fasa yang menggunakan saluran netral (baca saluran nol), dalam keadaan beban simetris maka arus yang lewat saluran nol adalah benar-benar nol (netral), tetapi bila terjadi keadaan tak simetris, maka sebagian arus (berupa arus resultan) akan lewat saluran netral ini, sehingga saluran tersebut menjadi tidak netral lagi. <sup>[5]</sup>

### 2.5.2 Penyaluran dan Susut Daya Pada Keadaan Arus Seimbang

Misalkan daya sebesar  $P$  disalurkan melalui suatu saluran dengan penghantar netral. Apabila pada penyaluran daya ini arus-arus fasa dalam keadaan seimbang, maka besarnya daya dapat dinyatakan sebagai berikut :

Dengan :

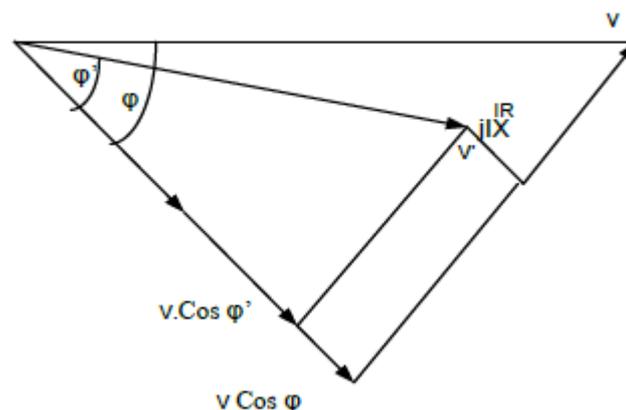
$$P = 3 \cdot [V] \cdot [I] \cdot \cos\phi \dots\dots\dots 2.23$$

$P$  : daya pada ujung kirim

$V$  : tegangan pada ujung kirim

$\cos\phi$  : faktor daya <sup>[1]</sup>

Daya yang sampai pada ujung terima akan lebih kecil dari  $P$  karena terjadi penyusutan dalam saluran. Penyusutan daya ini dapat diterangkan dengan menggunakan diagram fasor tegangan saluran model fasa tunggal seperti terlihat pada Gambar 2.9 di bawah ini :



Gambar 2.9 Diagram Fasor Tegangan Saluran Daya Model Fasa Tunggal <sup>[1]</sup>



Model ini dibuat dengan asumsi bahwa arus pemuatan kapasitif pada saluran cukup kecil sehingga dapat diabaikan. Dengan demikian besarnya arus di ujung kirim sama dengan arus di ujung terima. Apabila tegangan dan faktor daya pada ujung terima berturut-turut adalah  $V'$  dan  $\cos \phi'$  daya pada ujung terima adalah <sup>[1]</sup>:

$$P' = 3 \cdot [V'] \cdot [I] \cdot \cos \phi' \dots\dots\dots 2.24$$

Selisih antara  $P$  pada persamaan (2.23) dan  $P'$  pada persamaan (2.24) memberikan susut daya saluran, yaitu<sup>[6]</sup> :

$$P_1 = P - P' \dots\dots\dots 2.25$$

$$= 3 [V] [I] \cos \phi - 3 [V'] [I] \cos \phi' \dots\dots\dots 2.26$$

$$= 3 \cdot [I] \cdot \{ [V] \cos \phi - [V'] \cos \phi' \} \dots\dots\dots 2.27$$

Sementara itu gambar 2.9 memperlihatkan bahwa<sup>[1]</sup>:

$$[ [V] \cos \phi - [V'] \cos \phi' ] = [I] \cdot R \dots\dots\dots 2.28$$

Dengan  $R$  adalah tahanan kawat penghantar tiap fasa. Oleh karena itu persamaan 2.28 berubah menjadi<sup>[1]</sup>:

$$P_1 = 3 \cdot [I]^2 \cdot R \dots\dots\dots 2.29$$

### 2.5.3 Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan Beban

Untuk menentukan persentase ketidakseimbangan beban maka terlebih dahulu ditentukan arus rata-rata

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots 2.30$$

Persentase ketidakseimbangan didapat dari jumlah selisih antara arus per fasa dengan arus rata-rata, dibagi dengan total arus pada semua fasa

$$\% \text{ Ketidakseimbangan} = \frac{|I_R - I_{\text{rata-rata}}| + |I_S - I_{\text{rata-rata}}| + |I_T - I_{\text{rata-rata}}|}{I_R + I_S + I_T} \times 100\% \dots\dots\dots 2.31$$

### 2.5.4 Penyaluran dan Susut Daya pada Keadaan Arus tak Seimbang

Jika  $[I]$  adalah besaran arus fasa dalam penyaluran daya sebesar  $P$  pada keadaan seimbang maka pada penyaluran daya yang sama tetapi dengan keadaan tak seimbang besarnya arus-arus fasa dapat dinyatakan dengan koefisien  $a, b,$  dan  $c$  sebagai berikut<sup>[1]</sup>:



$$\left. \begin{aligned} [I_R] &= a[I] \\ [I_S] &= b[I] \\ [I_T] &= c[I] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots 2.32$$

Dengan  $I_R, I_S,$  dan  $I_T$  berturut-turut adalah arus fasa R,S,dan T.

Telah disebutkan diatas bahwa faktor daya ketiga fasa dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda. Dengan anggapan seperti itu besarnya daya yang disalurkan dapat dinyatakan sebagai<sup>[1]</sup>:

$$P=(a+b+c).[V].[I].\cos \phi \dots\dots\dots 2.33$$

Apabila persamaan (2.32) dan persamaan (2.33) menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan itu dapat diperoleh persyaratan untuk koefisien a,b,dan c yaitu<sup>[1]</sup>:

$$a+b+c=3 \dots\dots\dots 2.34$$

Dengan anggapan yang sama, arus yang mengalir di penghantar netral dapat dinyatakan sebagai berikut<sup>[1]</sup>:

$$I_N = I_R+I_S+I_T \dots\dots\dots 2.35$$

$$= [I][a+b \cos (-120^\circ)+ j b \sin (-120^\circ)+\cos (120^\circ)+j c \sin (120^\circ)] \dots\dots\dots 2.36$$

$$= [I][a-(b+c)/2+j(c-b)(\sqrt{3})/2] \dots\dots\dots 2.37$$

Susut daya saluran adalah jumlah susut daya pada penghantar fasa dan penghantar netral,adalah<sup>[1]</sup>:

$$P_1' = ([I_R]^2+[I_S]^2+[I_T]^2).R+[I_N]^2.R_N \dots\dots\dots 2.38$$

$$= (a^2+b^2+c^2)[I]^2R+( a^2+b^2+c^2-ab-ac-bc)[I_N]^2R_N \dots\dots\dots 2.39$$

Dengan  $R_N$  adalah tahanan penghantar netral.

Apabila persamaan (2.38) disubstitusikan ke persamaan (2.39) maka diperoleh<sup>[1]</sup>:

$$P_1'=(9-2(ab+ac+bc))[I]^2R+(9-3(ab+ac+bc))[I_N]^2R_N \dots\dots\dots 2.40$$

Persamaan 2.40 ini adalah susut daya saluran untuk saluran dengan penghantar netral. Apabila tidak ada penghantar netral maka persamaannya menjadi<sup>[1]</sup>:

$$P_1'=(9-2(ab+ac+bc))[I]^2R \dots\dots\dots 2.41$$



## 2.6 Arus Netral

Arus netral dalam sistem distribusi tenaga listrik dikenal sebagai arus yang mengalir pada kawat netral di sistem distribusi tegangan rendah tiga fasa empat kawat. Arus netral ini muncul jika<sup>[1]</sup> :

- a. Kondisi beban tidak seimbang
- b. Karena adanya arus harmonisa akibat beban non-linear.

Arus yang mengalir pada kawat netral yang merupakan arus bolak-balik untuk sistem distribusi tiga fasa empat kawat adalah penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris.<sup>[1]</sup>

### 2.6.1 Arus Netral Karena Beban Tidak Seimbang

Untuk arus tiga fasa dari suatu sistem yang tidak seimbang dapat juga diselesaikan dengan menggunakan metode komponen simetris. Dengan menggunakan notasi-notasi yang sama seperti pada tegangan akan didapatkan persamaan-persamaan untuk arus-arus fasanya sebagai berikut<sup>[1]</sup> :

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 \dots\dots\dots 2.42$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \dots\dots\dots 2.43$$

$$I_c = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \dots\dots\dots 2.44$$

Dengan tiga langkah yang telah dijabarkan dalam menentukan tegangan urutan positif, urutan negative, dan urutan nol terdahulu, maka arus-arus urutan juga dapat ditentukan dengan cara yang sama, sehingga kita dapatkan juga<sup>[1]</sup> :

$$I_1 = 1/3( I_a + a I_b + a^2 I_c ) \dots\dots\dots 2.45$$

$$I_2 = 1/3( I_a + a^2 I_b + a I_c ) \dots\dots\dots 2.46$$

$$I_0 = 1/3( I_a + I_b + I_c ) \dots\dots\dots 2.47$$

Di sini terlihat bahwa arus urutan nol ( $I_0$ ) adalah merupakan sepertiga dari arus netral atau sebaliknya akan menjadi nol jika dalam sistem tiga fasa empat kawat. Dalam sistem tiga fasa empat kawat ini jumlah arus saluran sama dengan arus netral yang kembali lewat kawat netral, menjadi<sup>[1]</sup> :

$$I_N = I_a + I_b + I_c \dots\dots\dots 2.48$$

$$I_N = I_R \{ \cos(0) + j \sin(0) \} + I_S \{ \cos(120) + j \sin(120) \} + I_T \{ \cos(240) + j \sin(240) \} \dots\dots 2.49$$

[2]



Dalam sistem tiga fasa empat kawat ini jumlah arus dalam saluran sama dengan arus netral yang kembali lewat kawat netral. Jika arus-arus fasanya seimbang maka arus netralnya akan bernilai nol, tapi jika arus-arus fasanya tidak seimbang, maka akan ada arus yang mengalir di kawat netral sistem (arus netral akan mempunyai nilai dalam arti tidak nol) <sup>[1]</sup>

#### 2.6.2 Losses Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral

Akibat pembebanan di tiap phasa yang tidak seimbang, maka akan mengalir arus pada penghantar netral. Jika di hantaran pentanahan netral terdapat nilai tahanan dan dialiri arus, maka kawat netral akan bertegangan yang menyebabkan tegangan pada trafo tidak seimbang. Arus yang mengalir di sepanjang kawat netral, akan menyebabkan rugi daya di sepanjang kawat netral sebesar <sup>[1]</sup> :

$$P_N = I_N R_N \dots\dots\dots 2.50$$

Dimana :

$P_N$  = Losses yang timbul pada penghantar netral (watt)

$I_N$  = Arus yang mengalir melalui kawat netral (Ampere)

$R_N$  = Tahanan pada kawat netral (Ohm) <sup>[1]</sup>