

792/HDI/85

# DASAR-DASAR LISTRIK

SERI A

PERPUSTAKAAN IKIP PADANG  
KOLEKSI BIDANG ILMU  
TIDAK DIPINJAMKAN  
KHUSUS DIPAKAI DALAM PERPUSTAKAAN



BILIK UPT PERPUSTAKAAN  
- IKIP - PADANG -

oleh

Drs. Jamin Sembiring

Fakultas Pendidikan Teknologi dan Kejuruan  
Institut Keguruan dan Ilmu Pendidikan

**PADANG**

1985

## KATA PENGANTAR

Salah satu mata kuliah yang terdapat pada jurusan Pendidikan Teknik Elektro dan Elektronika pada Fakultas Pendidikan Teknologi dan Kejuruan Institut Keguruan dan Ilmu Pendidikan Padang adalah : Dasar-Dasar Listrik.

Di mana mata kuliah tersebut disajikan/diajarkan pada semester ke tiga atau pada tingkat II semester pertama.

Adapun materi yang dibahas pada buku seri A ini adalah sebagai berikut : Pada bab pertama meliputi Pengertian, Nilai Rata-rata dan Nilai Efektif, Bilangan Komplek dan perbedaan fasa. Pada bab ke dua dibicarakan masalah yang menyangkut impedansi, Beban resistor, Beban induktor, Beban kapasitor baik dalam hubungan seri maupun paralel, Daya dan Faktor Daya. Pada bab yang terakhir atau bab ke tiga diuraikan masalah Resonansi baik dalam hubungan seri maupun hubungan paralel.

Semua pembahasan di atas disertai dengan beberapa contoh soal yang dimaksudkan agar para mahasiswa dapat menerapkan prinsip-prinsip atau teori-teori yang disajikan sebelumnya selain itu dimaksudkan juga agar para mahasiswa dapat melihat secara langsung sampai di mana dia dapat mengikuti apa yang dipelajarinya dan sekaligus untuk membimbing para mahasiswa dalam hal menyelesaikan soal-soal.

Dapat kami tambahkan bahwa materi dan soal-soal yang kami susun ini adalah sesuai dengan pengalaman kami dalam mengajar mata kuliah Dasar-Dasar Listrik di jurusan Pendidikan Teknik Elektro dan Elektronika Fakultas Pendidikan Teknologi dan Kejuruan Institut Keguruan dan Ilmu Pendidikan Padang.

Pada buku seri B nanti kami akan menguraikan/membicarakan masalah sistem tiga fasa, transformator satu fasa, motor-motor listrik satu fasa dan beberapa contoh soal.

Pada kesempatan ini kami ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu kami dalam penyelesaian buku ini, terutama kami aturkan banyak terima kasih kepada putra-putri kami tercinta yang rela mengorbankan waktu yang seharusnya diperuntukkan buat mereka.

Kami menyadari bahwa masih terdapat kekurangan-kekurangan baik dalam materi maupun sistematika penulisannya, hal ini disebabkan karena keterbatasan waktu serta pengalaman menulis yang relatif sedikit.

Oleh sebab itu kami mengharapkan tegur sapa dari para pembaca demi perbaikan buku ini dikemudian hari.

Padang, Mei 1985.

Penulis,

	PERPUSTAKAAN IKIP PADANG
DATE RECEIVED	23 September 85
SOURCE	Hadiah
NUMBER	K1
REMARKS	792 11a 185 - do 621
CLASSIFICATION	621.3 fm do

## DAFTAR ISI

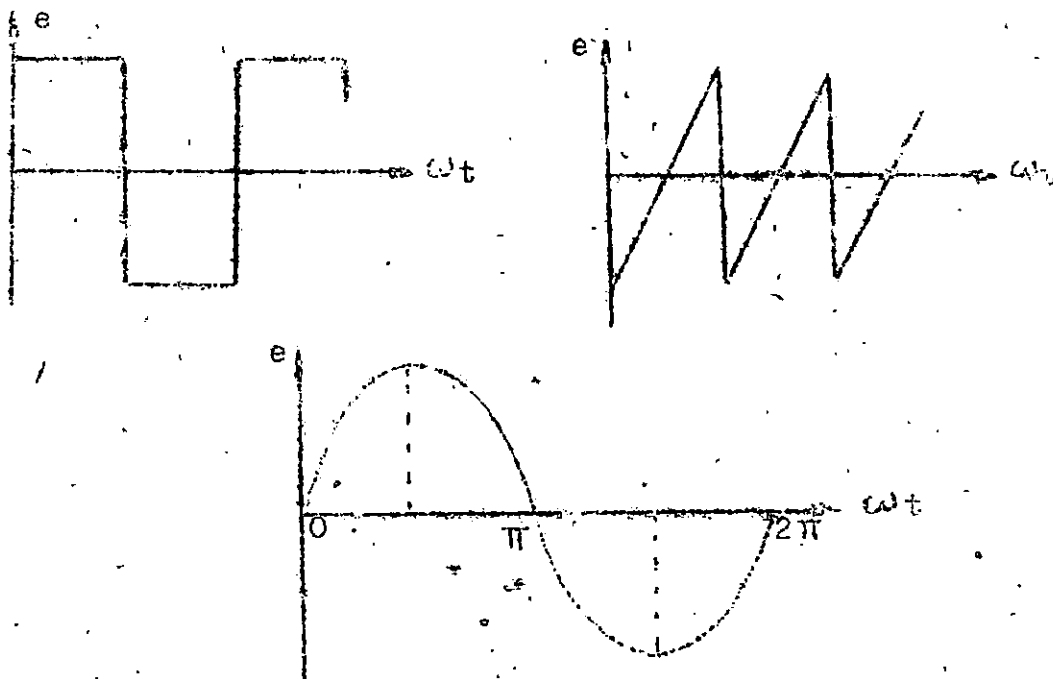
	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
BAB :	
I. PENDAHULUAN .....	1
A. Pengertian .....	31
B. Nilai Rata-Rata Dan Nilai Efektif .....	2
C. Bilangan Komplek .....	6
D. Beda Phasa .....	10
II. RANGKAIAN LISTRIK .....	15
A. Impedansi .....	15
B. Beban Resistor .....	16
C. Beban Induktor .....	18
D. Beban Kapasitor .....	22
E. Hubungan Seri Dan Paralel .....	26
1. Hubungan Seri RLC .....	26
2. Hubungan Paralel RLC .....	27
F. DAYA DAN FAKTOR DAYA .....	33
1. Arus dan Tegangan Sephasa .....	33
2. Arus dan Tegangan Berbeda Phasa .....	34
III. RESONANSI .....	39
A. Pengertian .....	39
B. Resonansi Seri .....	39
C. Resonansi Paralel .....	44
D. Faktor Kualitas .....	44
DAFTAR KEPUSTAKAAN .....	48

## B A B I

### PENDAHULUAN

#### A. PENGERTIAN

Yang dimaksud dengan listrik arus bolak-balik ialah listrik yang mengalir dengan arah yang berubah-ubah secara periodik. Di dalam teknik listrik dikenal beberapa jenis listrik arus bolak-balik, antara lain yang berbentuk gelombang kotak, bentuk gigi gergaji, sinusoidal dan lain sebagainya. Masing-masing bentuk gelombang itu tentu mempunyai sifat dan penggunaan masing-masing pula sesuai dengan kebutuhan. Untuk penerangan dan tenaga secara umum yang digunakan adalah listrik dalam bentuk sinusoidal, karena itu dalam pembicaraan selanjutnya yang dimaksud dengan listrik arus bolak-balik adalah arus listrik dengan bentuk sinusoidal. Perhatikan gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. a. Gelombang kotak.  
b. Gelombang gigi gergaji.  
c. Gelombang sinusoidal.

Listrik arus bolak-balik pada perinsipnya dihasilkan oleh generator arus bolak-balik (Generator AC). Di mana perinsip generator arus bolak-balik ini bekerja dengan mengubah tenaga mekenik menjadi tenaga listrik, dalam hal ini dengan jalan memutar lilitan kawat penghantar listrik dalam medan magnet serba sama dengan kecepatan sudut tertentu yang tetap. Atau sebaliknya dengan memutar medan magnet homogen disekitar lilitan kawat dengan kecepatan berputar yang tetap.

Secara umum bentuk persamaan arus listrik bolak-balik seperti pada gambar 1 (c) di bawah ini ialah :

$$e(t) = E_{\text{mak}} \sin \omega t \quad (1-1)$$

di mana :

$e$  = besar tegangan sesaat (Volt).

$E_{\text{mak}}$  = besar tegangan maksimum yang terbentuk (Volt).

$\omega$  = kecepatan sudut putaran medan magnet atau lilitan kawat (radial/detik).

$t$  = waktu tertentu (detik).

Gambar (c) di muka menunjukkan besarnya gelombang listrik yang dihasilkan suatu sumber tenaga listrik. Di dalam teknik listrik dikenal pengertian frekuensi yaitu banyaknya gelombang (getaran) listrik yang terbentuk dalam satu detik. Untuk listrik penerangan pada umumnya dipergunakan frekuensi 50 Hz. Indonesia menggunakan frekuensi 50 Hz, sedangkan negara-negara seperti Jepang dan Amerika adalah 60 Hz, demikian juga negara-negara Eropa lainnya.

## B. NILAI RATA-RATA DAN NILAI EFEKTIF

Kalau dalam listrik arus searah hanya dikenal satu jenis tegangan atau arus dari suatu sumber tenaga listrik maka di dalam listrik arus bolak-balik pada dasarnya dikenal 3 jenis nilai (harga) tegangan atau arus.

1. Nilai tegangan maksimum yaitu nilai tegangan sebenarnya yang paling tinggi yang dapat dicapai suatu sumber tenaga listrik arus bolak-balik, yakni tegangan maksimum  $E_{\text{mak}}$ .

2. Nilai tegangan rata-rata (average value), yaitu besarnya tegangan bila bentuk setengah gelombang sinusoidal dijadikan bentuk gelombang dengan luas daerah yang dilingkupinya tetap sama. Hal ini dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan :

$$E_{\text{av}} = \int_0^{\frac{T}{2}} e \, dt \quad (1-2)$$

di mana :  $E_{\text{av}}$  = tegangan rata-rata (Volt)

$T$  = waktu perioda (detik)

$e$  = tegangan sesaat (Volt)

Untuk suatu tegangan dalam bentuk sinusoidal, maka nilai-nilai yang diambil ialah :

$$t = \frac{\phi}{\omega} \quad (1-3)$$

dan pada saat  $t = T$ , maka :

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1-4)$$

Sedangkan dalam hal ini, besar tegangan sesaat  $e(t)$  adalah sesuai dengan persamaan (1-1). Bila nilai-nilai persamaan (1-1), (1-3) dan (1-4) dimasukkan pada persamaan (1-2), maka diperoleh besar :

$$E_{\text{av}} = \frac{2 E_{\text{mak}}}{\pi} = 0,637 E_{\text{mak}} \quad (1-5)$$

3. Nilai tegangan efektif  $E$ , yakni harga tegangan suatu arus bolak-balik yang nilainya sama dengan besar listrik arus searah dengan menimbulkan pengaruh panas yang sama dalam suatu pemakaian yang sama dalam suatu hambatan murni  $R$ . Panas yang terbentuk karena pengaruh listrik searah dapat dijadikan dalam bentuk :

$$P = \frac{E^2}{R} \quad (1-6)$$

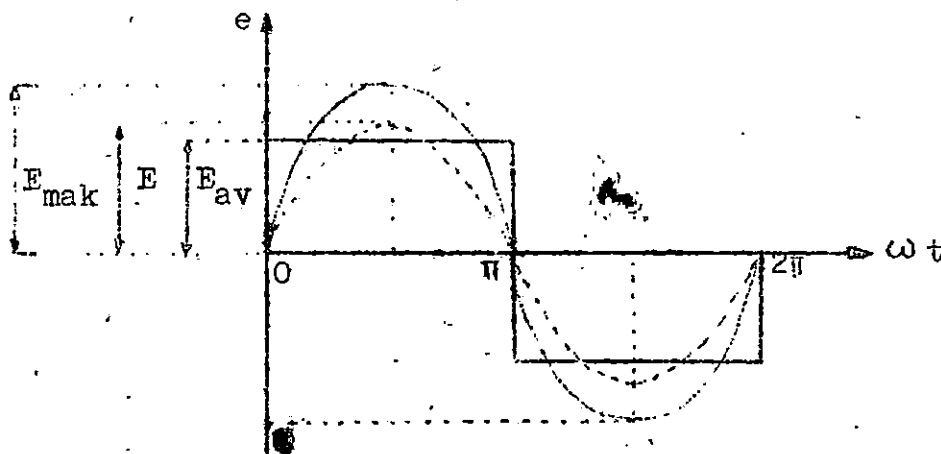
Sedangkan besar daya yang sama karena pengaruh arus bolak-balik dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$P = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{e^2}{R} d\phi \quad (1.7)$$

karena besar persamaan 1.6 sama dengan 1.7 dan sesuai dengan persamaan 1.1, maka diperoleh :

$$E = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = 0,707 E_{\max} \quad (1.8)$$

Untuk lebih jelasnya perhatikanlah gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Hubungan tegangan & tegangan.

Jika digunakan alat-alat ukur, maka pada pembacaan meter-meter yang terbaca adalah harga efektif. Khususnya pengukuran dengan CRO akan menghasilkan pembacaan maksimum. Nilai-nilai maksimum, rata-rata dan efektif tidak hanya berlaku buat harga tegangan tapi juga buat harga arus listrik. Karena itu dikenal pula :

$$I_{av} = \frac{2 I_{\max}}{\pi} = 0,637 I_{\max} \quad (1.9)$$

$$I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} = 0,707 I_{\max} \quad (1.10)$$



di mana :  $I_{max}$  = arus maksimum (Ampere)  
 $I_{av}$  = arus rata-rata (Ampere)  
 $I$  = arus efektif (Ampere)

Adapun besar frekuensi listrik yang dihasilkan suatu sumber tenaga listrik tergantung pada kecepatan berputar fluks magnet atau lilitan kawat, yang disebut kecepatan sudut :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (1.11)$$

di mana :  $f$  = frekuensi listrik (Hz)  
 $\omega$  = kecepatan sudut berputar (radial/detik)

Contoh I.

Sebuah sumber tenaga listrik arus bolak-balik menghasilkan tegangan dengan persamaan sebesar :

$$e(t) = 181,43 \sin(314 t) \text{ Volt.}$$

Berdasarkan persamaan tersebut, tentukanlah besarnya :

1. tegangan maksimum  $E_{max}$
2. tegangan rata-rata  $E_{av}$
3. tegangan efektif  $E$
4. frekuensi listrik yang dihasilkan sumber

Jawab :

1. Sesuai dengan persamaan (1.1), maka diperoleh :  
 tegangan maksimum  $E_{max} = 181,43 \text{ Volt.}$
2. Dengan persamaan (1.5) , diperoleh besarnya :  
 tegangan rata-rata  $E_{av} = 115,57 \text{ Volt.}$
3. Sedangkan berdasarkan persamaan (1.8), diperoleh :  
 tegangan efektif  $E = 127 \text{ Volt.}$
4. Demikian pula berdasarkan persamaan (1.1) diperoleh  $\omega = 314$ . Dan sesuai dengan persamaan (1.11) dapat dicari besar frekuensi  $f = 50 \text{ Hz.}$

Contoh II.

Sebuah sumber tenaga listrik arus bolak-balik menghasilkan arus sebesar 50 A dengan frekuensi 50 Hz. Berdasarkan data-data yang diketahui, tentukanlah besarnya persamaan arus yang dihasilkan sumber.

Penyelesaian :

Arus 50 A berarti bahwa arus efektif  $I = 50$  A. Sedangkan besar kecepatan sudut di cari berdasarkan persamaan (1.11), sehingga diperoleh besar  $\omega = 314$  rad/det. Maka secara umum besar arus yang dihasilkan sumber adalah

$$i(t) = I_{max} \sin \omega t$$

Besar arus maksimum yang dihasilkan dicari berdasarkan persamaan (1.10) sehingga diperoleh  $I_{max} = 71,43$  A. Sehingga besar persamaan arus adalah :

$$i(t) = 71,43 \sin (314 t) \text{ Ampere.}$$

C. BILANGAN KOMPLEK.

Kalau nilai-nilai yang terdapat pada suatu rangkaian listrik arus searah merupakan nilai-nilai yang nyata, maka dalam suatu rangkaian listrik arus bolak-balik banyak terdapat bilangan-bilangan khayal (imaginir). Karena itu dalam rangkaian listrik arus bolak-balik banyak digunakan bilangan-bilangan khayal yang dinyatakan dalam bilangan kompleks, yakni kumpulan/susunan bilangan-bilangan yang terdiri dari bilangan nyata dan bilangan khayal. Secara umum hal ini dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$Z = x + j y \tag{1.12}$$

di mana notasi  $j$  menyatakan/menunjukkan nilai khayal dengan besar :

$$j = \sqrt{-1} \tag{1.13}$$

Bentuk bilangan kompleks pada persamaan (1.12) biasa juga disebut bentuk sistim sumbu saling tegak lurus (rectangular form). Di samping bentuk di atas juga dikenal bentuk-bentuk lainnya yang mempunyai hubungan satu dengan lainnya yaitu :

\* bentuk polar (polar atau Steinmetz form)

$$Z = r \angle \varphi \tag{1.14}$$

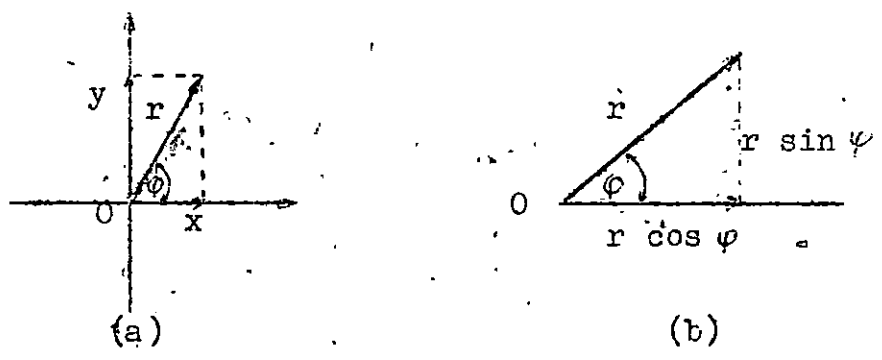
\* bentuk eksponensial (exponential form)

$$Z = r e^{i\varphi} \tag{1.15}$$

\* bentuk trigonometri (trigonometric form)

$$Z = r (\cos \varphi + i \sin \varphi) \tag{1.16}$$

Di mana hubungan-hubungan di atas dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 3. a. Sistim sumbu saling tegak lurus.  
b. Sistim polar dan trigonometri.

Dalam bilangan kompleks ini dikenal pula pengertian bilangan konjuget (conjugate complex) yang pada dasarnya menyatakan bentuk negatif dari sudut atau arah. Karena itu dikenal bentuk :

$$* Z = x + j y \quad \longleftrightarrow \quad Z = x - j y \tag{1.17}$$

$$* Z = r \angle \varphi \quad \longleftrightarrow \quad Z = r \angle -\varphi \tag{1.18}$$

$$* Z = r e^{i\phi} \longrightarrow Z^* = r e^{-i\phi} \quad (1.19)$$

$$* Z = r (\cos \phi + i \sin \phi) \rightarrow Z^* = r (\cos \phi - i \sin \phi) \quad (1.20)$$

Bentuk bilangan kompleks dalam bentuk polar sering juga disebut sebagai bentuk phasor dengan :

- r menyatakan besaran (magnitude) dan
- $\phi$  menyatakan arah.

Dalam menyelesaikan persoalan-persoalan dalam bentuk bilangan kompleks ini, pada umumnya dapat digunakan prinsip:

1. Menjumlahkan dan mengurang.

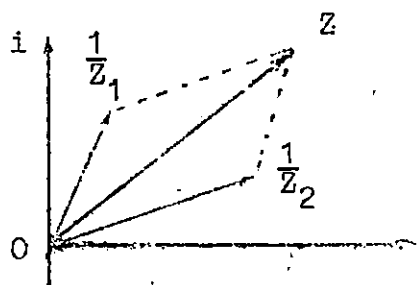
Untuk menjumlahkan atau mengurangi cara yang baik adalah dengan menggunakan bentuk sumbu tegak lurus, dengan prinsip :

- \* menjumlahkan, dengan menambahkan bilangan nyata dengan bilangan nyata dan menambahkan bilangan khayal dengan bilangan khayal.
- \* mengurangi, dengan jalan mengurangi bilangan nyata dengan bilangan nyata dan mengurangi bilangan khayal dengan bilangan khayal.

$$\begin{aligned} Z_1 + Z_2 &= (x_1 + j y_1) + (x_2 + j y_2) \\ Z &= (x_1 + x_2) + j (y_1 + y_2) \end{aligned} \quad (1.21)$$

$$\begin{aligned} Z_1 - Z_2 &= (x_1 + j y_1) - (x_2 - j y_2) \\ Z &= (x_1 - x_2) + j (y_1 + y_2) \end{aligned} \quad (1.22)$$

Jadi kalau diperhatikan lebih jauh ternyata bentuk penjumlahan atau pengurangan ini seperti pengurangan atau penjumlahan dari suatu bentuk gaya-gaya atau vektor.



Gambar 4. Penjumlahan

## 2. Mengalikan dan membagi

Cara yang paling mudah untuk mengalikan atau membagi adalah dengan menggunakan bentuk polar (phasor), yakni mengalikan, dengan jalan saling mengalikan besarnya sedangkan besar sudut dijumlahkan.

$$\begin{aligned} Z_1 \cdot Z_2 &= r_1 \angle \varphi_1 \times r_2 \angle \varphi_2 \\ &= r_1 r_2 \angle \varphi_1 + \varphi_2 \end{aligned} \quad (1.1)$$

\* membagi, dengan jalan besarnya saling dibagi sedangkan sudut dikurangkan.

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{r_1 \angle \varphi_1}{r_2 \angle \varphi_2} = \frac{r_1}{r_2} \angle \varphi_1 - \varphi_2 \quad (1.2)$$

Contoh 1.

Ubahlah bentuk sistim polar di bawah ini menjadi bentuk sistim sumbu tegak lurus dan gambar :

1.  $50 \angle 53^\circ 6'$

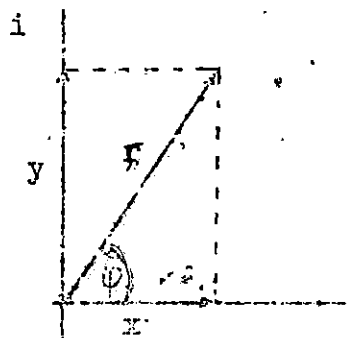
2.  $100 \angle -120^\circ$

Penyelesaian.

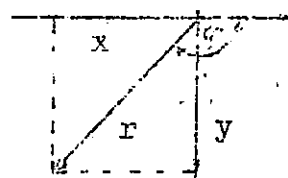
- Pengubahan dari sistim polar menjadi sistim tegak lurus dengan terlebih dahulu merubah sistim polar, tersebut menjadi sistim trigonometri.

$$\begin{aligned} 50 \angle 53^\circ 6' &= 50 \cos 53^\circ 6' + \\ &\quad j 50 \sin 53^\circ 6' \\ &= 30 + j 40 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2. \quad 100 \angle -120^\circ &= 100 \cos (-120) \\ &\quad + j 100 \sin (-120) \\ &= -50 - j 86,6 \end{aligned}$$



Gb. 5



Gb. 6

Contoh 2.

Ubahlah bentuk  $Z = 4 + j 3$  menjadi bentuk polar.

Penyelesaian.

Harga besaran  $r$  ditentukan dari  $r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{4^2 + 3^2}$

Sedangkan besar sudut  $\varphi$  dapat ditentukan dengan :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{y}{x} = \frac{3}{4}$$

$$\varphi = 36^\circ 54' \quad (\text{lihat gambar 5}).$$

$$\text{Jadi besar } Z = 4 + j 3 = 5 \underline{/36^\circ 54'}$$

#### D. BEDA PHASA.

Kalau dalam rangkaian arus listrik arus searah dapat dilihat bahwa bila diadakan bentuk penjumlahan maka nilai nilai tersebut langsung dijumlahkan, yang biasa disebut dengan menjumlahkan secara aljabar. Tetapi pada suatu rangkaian listrik arus bolak-balik terdapat hal yang berlainan. Pada persamaan (1.21) dan gambar 4 dapat di lihat bahwa untuk menjumlahkan tersebut selain nilai besarnya juga perlu dilihat arah/besar sudutnya (bandingkan dengan penjumlahan pada suatu gaya-gaya). Ini berarti bahwa antara bilangan-bilangan yang dijumlahkan perlu pula diperhatikan adanya beda sudut antara nilai-nilai yang dijumlahkan yang sering disebut dengan istilah beda phasa. Demikian pula sering terjadi bahwa dalam suatu benda/alat yang menggunakan listrik arus bolak-balik terdapat dua tegangan atau arus yang keduanya mungkin mempunyai beda phasa. Jika akan menjumlahkan tegangan atau arus bolak-balik ini maka perlu diingat frekuensinya harus sama, sebab bila tidak sama maka hasil bentuk penjumlahan tidak akan sama seperti bentuk yang dijumlahkan. Dengan kata lain terjadi perubahan bentuk.

Jika diketahui besar arus sesaat dari dua arus yang berbeda phasa seperti di bawah ini :

$$i_1(t) = I_{\max 1} \sin \omega t \quad ; \quad i_2(t) = I_{\max 2} \sin (\omega t + \varphi)$$

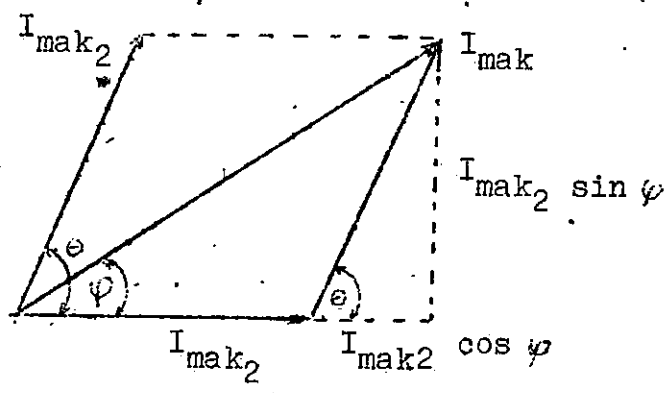
dijumlahkan, maka diperoleh besar arus jumlah sesaat :

$$i(t) = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.24)$$

di mana diperoleh :

$$I_{\max} = \sqrt{I_{\max 1}^2 + I_{\max 2}^2 + 2I_{\max 1} \cdot I_{\max 2} \cos \phi} \quad (1.25)$$

Beda fase antara arus yang dicari dapat dihitung dengan memperhatikan gambar 7 di bawah ini, yang merupakan penggambaran nilai-nilai maksimum arus pada saat mu; a-mula,



Gambar 7. Menjumlahkan arus.

Dari gambar dapat di lihat, bahwa untuk mencari beda fase arus jumlah  $I_{\max}$  dengan arus  $I_{\max 1}$  dapat digunakan :

$$\cos \theta = \frac{I_{\max 1} + I_{\max 2} \cos \phi}{I_{\max}} \quad (1.26)$$

atau dapat juga diperoleh dengan :

$$\text{tg } \theta = \frac{I_{\max 2} \sin \phi}{I_{\max 1} + I_{\max 2} \cos \phi} \quad (1.27)$$

Untuk menentukan besar sudut fase-sudut fase dari suatu persamaan tentu harus ada yang merupakan titik/batas pandangan dalam penentuan tersebut dan harus dari pandangan yang sama. Dari persamaan-persamaan di atas yang dijadikan dasar pandangan ialah kedudukan  $i_1(t)$ .

Cara yang sama juga dapat dilakukan pada penjumlahan tegangan-tegangan. Dalam penjumlahan-penjumlahan pada dasarnya terdapat dua kemungkinan prinsip penjumlahan :

1. Penjumlahan sephasa.

Ini berarti bahwa kedua nilai, baik tegangan ataupun arus yang dijumlahkan, dimulai dari kedudukan yang sama. Dengan kata lain beda fasa adalah nol.

2. Penjumlahan tidak sephasa.

Ini berarti bahwa kedua nilai dimulai dari dua kedudukan yang berlainan, jadi terdapat beda fasa.

Contoh 1.

Ditentukan dua persamaan arus listrik :

$$i_1(t) = 12 \sin \omega t \text{ Ampere, dan}$$

$$i_2(t) = 8 \sin \omega t \text{ Ampere.}$$

saling dijumlahkan, sehingga diperoleh arus jumlah.

Tentukanlah : 1. Persamaan arus jumlah.

2. Gambar bentuk penjumlahan tersebut.

Jawab. Dari kedua persamaan dapat dilihat bahwa antara kedua arus tidak terdapat perbedaan sudut fasa dengan kata lain beda fasa adalah nol. Jika besar arus jumlah adalah :

$i(t) = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$  Ampere, maka sesuai dengan persamaan (1.25), diperolehlah :

$$I_{\max} = \sqrt{12^2 + 8^2 + 2 \times 12 \times 8 \times \cos \emptyset}$$

$$= 20 \text{ Ampere.}$$

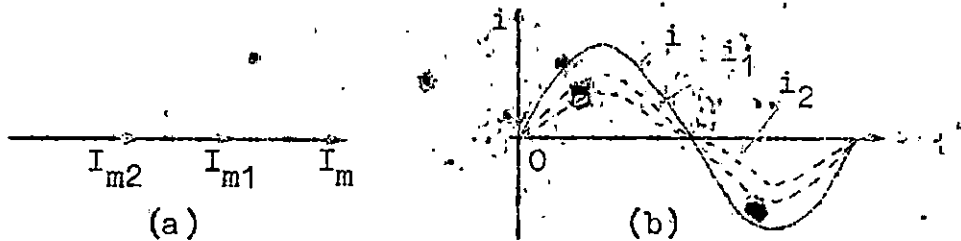
Sesuai dengan persamaan (1.27), maka diperoleh sudut arus jumlah  $\varphi = 0$ . Sehingga diperoleh persamaan arus jumlah :

$$i(t) = 20 \sin \omega t \text{ Ampere.}$$

2. Jika arus dari ketiga persamaan di atas digambarkan, maka diperolehlah penggambaran seperti gambar 8 di bawah ini.



Gambar 8 a menggambarkan nilai-nilai arus maksimumnya, sedangkan gambar 8b menggambarkan bentuk grafik sinusoidalnya.



Gambar 8. a. Penjumlahan vektoris  
b. Bentuk grafis.

Contoh 2.

Diketahui dua persamaan tegangan arus listrik yakni :

$$e_1(t) = 8 \sin \omega t \text{ Volt ; } e_2(t) = 12 \sin(\omega t + 60^\circ)$$

Tentukanlah : 1. Persamaan tegangan jumlah.

2. Gambar bentuk penjumlahan tersebut.

Jawab. 1. Untuk menentukan persamaan tegangan jumlah caranya sama dengan pada perjumlahan arus, hanya bentuk arus diganti dengan tegangan. Sehingga bila ditentukan besar tegangan jumlah adalah :

$$e(t) = E_{\text{mak}} \sin(\omega t + \varphi) \text{ Volt.}$$

Maka besar tegangan maksimum sesuai dengan persamaan (1.25) adalah :

$$E_{\text{mak}} = \sqrt{8^2 + 12^2 + 2 \times 8 \times 12 \cos 60^\circ}$$

$$= 17,45 \text{ Volt.}$$

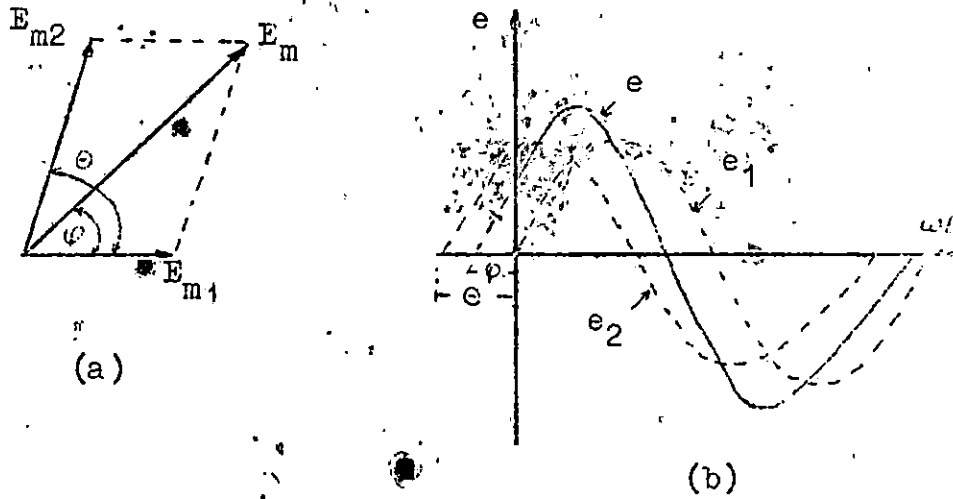
Sedangkan beda sudut phasa tegangan jumlah terhadap tegangan  $e_1$  ditentukan sesuai dengan persamaan (1.27) yakni :

$$\tan \varphi = \frac{12 \sin 60^\circ}{8 + 12 \cos 60^\circ} = 36^\circ 36'$$

Maka diperoleh persamaan tegangan jumlah :

$$e(t) = 17,45 \sin(\omega t + 36^\circ 36') \text{ Volt.}$$

2. Penggambarannya adalah seperti gambar 9 di bawah ini.



Gambar 9. . a. Penjumlahan vektoris.  
b. Bentuk grafis.

## BAB II

### RANGKAIAN LISTRIK

#### A. IMPEDANSI

Pada rangkaian listrik arus searah semua peralatan yang menggunakan tenaga listrik arus searah pada dasarnya dapat diganti dengan beban pengganti dalam bentuk hambatan murni (resistor R). Jadi beban pada listrik arus searah hanya satu jenis saja. Hal ini berlainan dengan listrik arus bolak-balik. Secara teoritis jenis beban pada rangkaian listrik arus bolak-balik ini dapat dibagi atas tiga jenis yakni :

1. Beban hambatan murni (resistor).
2. Beban induktansi murni (induktor).
3. Beban kapasitansi murni (kapasitor).

Namun dalam praktek adalah sangat sukar memperoleh jenis-jenis beban dalam keadaan murni. Dan dengan adanya berbagai jenis beban ini, maka akan terdapat pula bermacam-macam hubungan antara tegangan dan arus yang mengalir pada beban tersebut, antara lain adanya beda fasa antara tegangan dan arus yang mengalir. Di mana secara umum pengertian beban pada rangkaian listrik arus bolak-balik dapat diganti dengan istilah impedansi (Z), di mana :

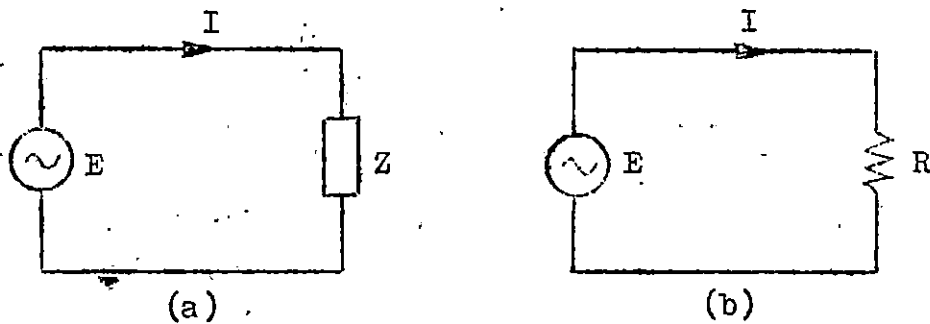
$$Z = R + j X \quad (2.1)$$

di mana  $Z$  = impedansi (Ohm).

$R$  = hambatan murni (Ohm).

$X$  = reaktansi (Ohm).

Jadi besar impedansi merupakan suatu bentuk vektorial di mana nilai reaktansi tergantung pada jenis beban yang dilayani. Secara umum bentuk-bentuk persamaan pada rangkaian listrik arus searah juga berlaku pada arus bolak-balik ini. Hanya perlu diingat semua bentuk beban murni R harus diganti dengan impedansi Z. Sehingga semua perhitungan dikerjakan dalam bentuk vektoris/phasor.



Gb. 1 a. rangkaian arus bolak-balik  
b. beban resistor

## B. BEBAN RESISTOR

Disebut merupakan beban resistor (hambatan murni) bila nilai reaktansi  $X$  pada impedansi  $Z$  mempunyai harga nol. Sebenarnya dalam praktek sangat sukar memperoleh hambatan murni ini. Sehingga beban resistor tersebut dapat ditulis persamaannya sebagai berikut :

$$Z = R + j 0 \quad (2.2)$$

Kalau hambatan dalam bentuk bilangan phasor, maka beban resistor ini menjadi bentuk :

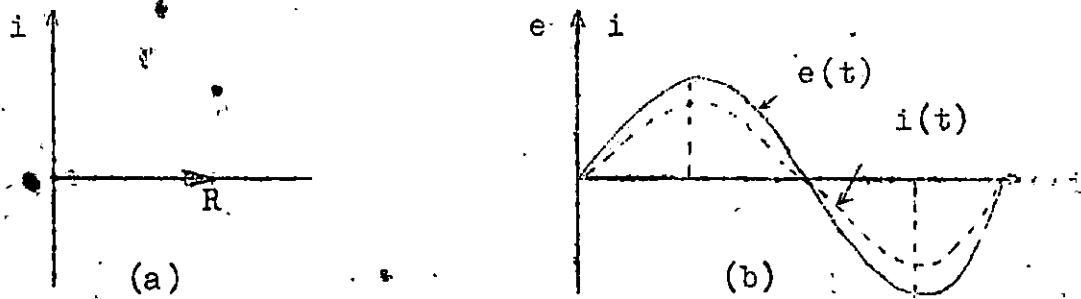
$$Z = Z \angle 0^\circ \quad (2.3)$$

Kalau secara umum persamaan hukum Ohm dapat ditulis :

$$Z = \frac{E}{I} \quad (2.4)$$

Maka sesuai dengan persamaan (2.3) dapat dilihat bahwa bila listrik arus bolak-balik mengalir pada rangkaian hambatan murni  $R$  maka tegangan dan arus listrik yang mengalir adalah sefasa. Dengan kata lain, bila terdapat aliran arus listrik pada hambatan murni  $R$ , maka arus dan tegangan sefasa (inphase current). Perhatikan gambar 2 di bawah ini. Bila diketahui arus yang mengalir adalah  $i(t)$ , maka tegangan terbentuk pada ujung-ujung resistor adalah:

$$e_R(t) = R i_R(t) \quad (2.5)$$



Gbr.2. a. Penggambaran vektoris  
b. Bentuk arus dan tegangan sefase

Dan sebaliknya, bila besar tegangan yang melalui hambatan murni R adalah  $e(t)$ , maka besar arus mengalir adalah

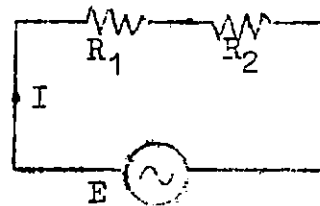
$$i_R(t) = \frac{e_R(t)}{R} \quad (2.6)$$

Seperti juga rangkaian arus searah, di mana sering terdapat beban dalam bentuk hubungan seri, paralel atau campuran. Maka dalam rangkaian arus bolak-balik ini pun terdapat hal yang sama.

1. Bila beberapa resistor dihubungkan secara seri, maka besar resistor pengganti hubungan seri adalah :

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (2.7)$$

Sedangkan besar tegangan sumber sama dengan besar jumlah tegangan-tegangan yang terbentuk pada ujung-ujung resistor.



Gb. 3 Hubungan seri

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n \quad (2.8)$$

Seperti juga pada arus searah, maka pada hubungan seri besar arus yang mengalir pada tiap-tiap resistor sama besar.

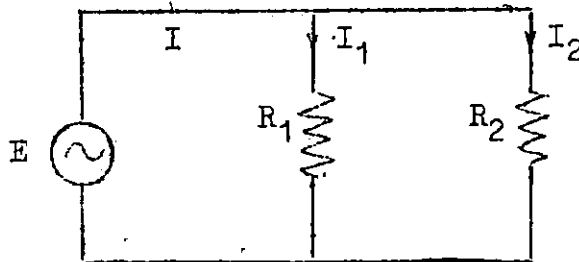
2. Bila beberapa resistor dihubungkan secara paralel, maka besar resistor pengganti hubungan paralel adalah :

621.3  
Amu  
d2

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (2.9)$$

Pada hubungan paralel yang sama besar adalah tegangan. Sedangkan besar arus induk merupakan penjumlahan masing-masing arus cabang yang mengalir pada tiap-tiap resistor.

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (2.10)$$



Gambar 4. Hubungan paralel

Kalau terdapat hubungan campuran (seri-paralel), maka terlebih dahulu diselesaikan hubungan serinya baru seluruh persoalan diselesaikan secara paralel.

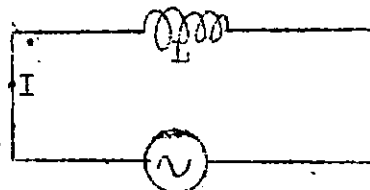
### C. BEBAN INDUKTOR.

Induktor pada prinsipnya merupakan benda yang terdiri dari gulungan kawat tertentu yang bila dialiri arus listrik akan menghasilkan induktansi  $L$ . Di mana induktansi ini akan menghambat aliran arus listrik sebesar :

$$X_L = 2\pi f L \quad (2.11)$$

di mana :  $X_L$  = reaktansi induktif (Ohm).  
 $f$  = frekuensi listrik (Hz).  
 $L$  = induktansi kumparan (Henry).

Beban induktor murni yang dialiri arus searah dengan sendirinya tidak akan menghasilkan suatu reaktansi, karena listrik



Gambar 5. Beban induktor

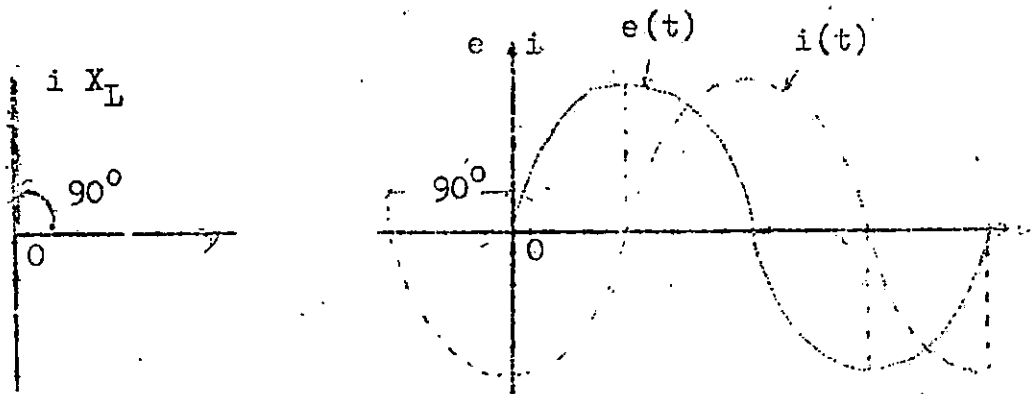
mempunyai frekuensi nol. Perhatikan persamaan (2.11).  
 Suatu induktor murni mempunyai impedansi sebesar :

$$Z = 0 + j X_L \quad (2.12)$$

yang dalam bentuk fasor adalah :

$$Z = 90^\circ \quad (2.13)$$

Secara umum hukum Ohm juga berlaku seperti persamaan (2.13), ini berarti bahwa antara arus dan tegangan terdapat pada suatu rangkaian arus listrik bolak-balik beberapa induktor murni, terdapat perbedaan fasa di mana arus tertinggal (lagging current) sebesar  $90^\circ$  listrik. Perhatikan gambar 6 di bawah ini.



Gambar 6. a. Penggambaran vektoris  
 b. Bentuk tegangan dan arus yang berbeda fasa  $90^\circ$  listrik.

Jika ditentukan besar persamaan arus yang mengalir pada suatu induktor adalah  $i(t)$ , maka besar tegangan yang terbentuk di antara ujung-ujung induktor tersebut adalah :

$$e_L(t) = L \frac{di}{dt} \quad (2.14)$$

Dan bila diketahui persamaan tegangan yang diberikan pada suatu induktor adalah  $e_L(t)$ , maka besar persamaan arus :

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int e dt \quad (2.15)$$

Jika beberapa buah induktor dihubungkan dalam beberapa bentuk, maka pada prinsipnya :

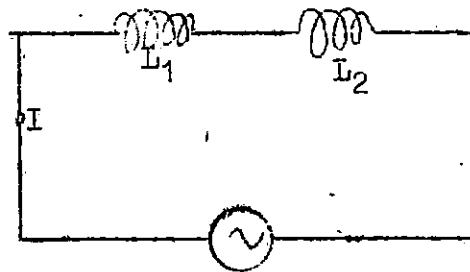
1. Bila induktor dihubungkan secara seri, maka besar reaktansi induktif pengganti hubungan seri adalah :

$$X_{Ls} = X_{L_1} + X_{L_2} + X_{L_3} + \dots + X_{L_n} \quad (2.16)$$

Sesuai dengan persamaan (2.11), maka didapat pula :

$$L_s = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n \quad (2.17)$$

Sedangkan besar tegangan yang terbentuk pada kedua ujung masing-masing induktor sesuai dengan bentuk persamaan pada hubungan seri pada persamaan (2.9). Tentu saja pada hubungan seri ini, besar arus yang mengalir pada setiap induktor sama besar.



Gambar 7. Hubungan seri induktor.

2. Bila beberapa induktor dihubungkan paralel, maka besar reaktansi pengganti hubungan paralel adalah :

$$\frac{1}{X_{Lp}} = \frac{1}{X_{L_1}} + \frac{1}{X_{L_2}} + \frac{1}{X_{L_3}} + \frac{1}{X_{L_4}} + \dots + \frac{1}{X_{L_n}} \quad (2.18)$$

Dan sesuai dengan persamaan (2.11), diperoleh :

$$\frac{1}{L_p} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n} \quad (2.19)$$



Sedangkan besar arus sumber/induk akan sesuai pula dengan bentuk arus pada persamaan (2.10), demikian pula prinsip penggambaran rangkaian arus listriknya sesuai dengan bentuk gambar 4 dengan mengganti R dengan L.

Di muka telah dijelaskan bahwa induktor merupakan sebuah kumparan yang dibuat dari lilitan kawat. Seperti telah diketahui setiap benda tertentu mempunyai hambatan ny- sebesar :

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.20)$$

dengan arti ; R = hambatan murni (Ohm)  
 $\rho$  = hambatan jenis (Ohm/m/mm<sup>2</sup>)  
 L = panjang benda (m)  
 A = luas penampang (mm<sup>2</sup>)

Ini berarti bahwa bagaimanapun sebuah induktor mempunyai hambatan murni R selain reaktansi induktif  $X_L$ . Di mana kedua nilai ini merupakan hubungan seri, yang dinyatakan dalam :

$$Z = R_L + i X_L \quad (2.21)$$

Dan bila dinyatakan dalam bentuk fasor, maka diperoleh :

$$Z = z \angle \varphi \quad (2.22)$$

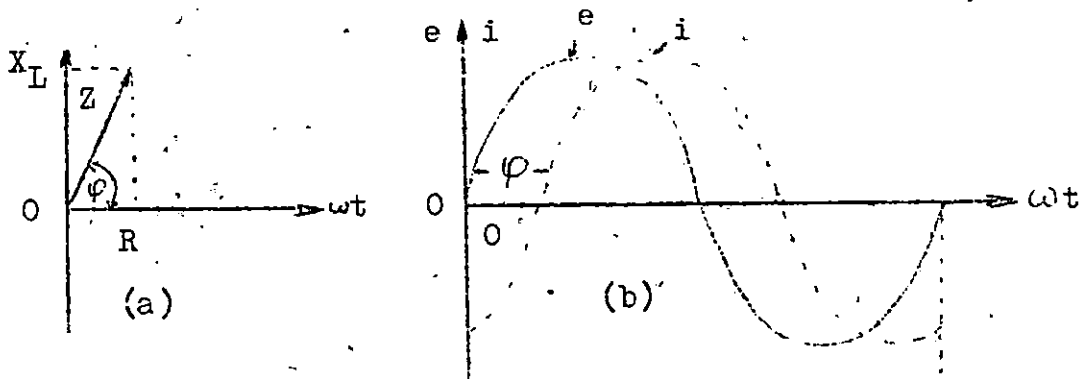
Nilai besaran Z diperoleh dengan :

$$Z = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} \quad (2.23)$$

Dan besar sudut fasa  $\varphi$ , dicari dengan rumus :

$$\tan \varphi = \frac{X_L}{R_L} \quad (2.24)$$

Dengan adanya perubahan besar sudut fasa pada impedansi induktor ini maka arus dan teganganpun akan berbeda fasa yang besarnya sesuai dengan beda fasa impedansi di atas, yakni lebih besar  $0^\circ$  dan lebih kecil dari  $90^\circ$ . Perhatikan gambar 8 di bawah ini.



Gb. 8 a. Bentuk vektoris  
b. Bentuk arus-tegangan dimana arus tertinggal sebesar  $\phi$ .

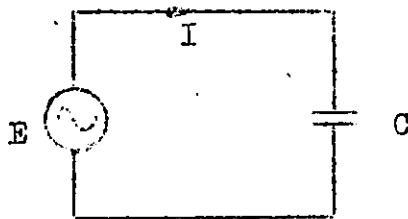
#### D. BEBAN KAPASITOR

Kapasitor pada dasarnya merupakan sebuah benda yang terdiri dari susunan dua lempeng yang terletak sangat dekat dan mampu menyimpan muatan-muatan listrik. Apabila kapasitor dilalui arus listrik, maka kapasitor akan memberikan hambatan sebesar :

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.25)$$

di mana:  $X_C$  = reaktansi kapasitif (Ohm)  
 $f$  = frekuensi listrik (Hz)  
 $C$  = kapasitas dari kapasitor (Farad)

Kapasitor dengan sendirinya tidak dapat dialiri arus searah, karena kapasitor bekerja dengan menyimpan dan mengeluarkan muatan-muatan listrik secara bergantian. Hal ini hanya dapat terjadi pada arus bolak-balik dengan adanya pergantian fasa positif dan negatif.



Gambar 9. Beban kapasitor.

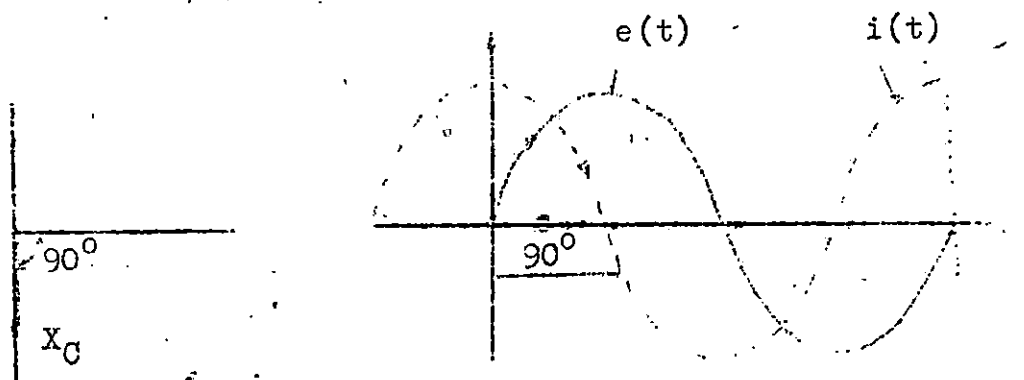
Kapasitor murni mempunyai impedansi sebesar :

$$Z = 0 - j X_C \quad (2.26)$$

yang dalam bentuk fasor adalah :

$$\underline{Z} = Z \angle -90^\circ \quad (2.27)$$

Seperti juga sebuah induktor, maka bila pada suatu rangkaian listrik terdapat sebuah kapasitor murni, maka antara tegangan dan arus listrik yang mengalir terdapat beda fase sebesar  $90^\circ$  listrik. Hanya di sini terdapat perbedaan di mana pada beban ~~induktor~~ <sup>kapasitor</sup> ini arus mendahului. Perhatikan gambar 10 di bawah ini.



Gb. 10. a. Penggambaran vektoris.  
b. Bentuk tegangan dan arus yang berbeda fase  $90^\circ$  listrik.

Jika besar persamaan arus yang melalui kapasitor adalah  $i_C(t)$ , maka tegangan yang terbentuk di antara kedua ujung kapasitor adalah :

$$e_C(t) = \frac{1}{C} \int i_C dt \quad (2.28)$$

Dan bila diberikan persamaan tegangan sebesar  $e_C(t)$  pada sebuah kapasitor, maka persamaan arus yang mengalir pada rangkaian tersebut adalah :

$$i_C(t) = C \frac{de}{dt} \quad (2.29)$$

Dalam suatu rangkaian arus bolak-balik mungkin terjadi/terdapat beberapa kapasitor yang disusun dalam susunan seperti di bawah ini :

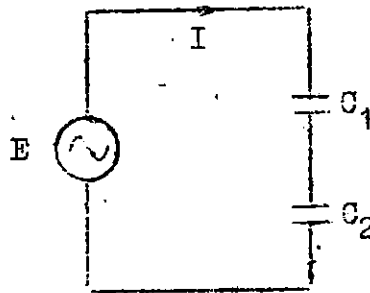
1. Hubungan seri, maka besar reaktansi kapasitip pengganti hubungan seri dari kapasitor-kapasitor tersebut adalah :

$$X_{Cs} = X_{C_1} + X_{C_2} + X_{C_3} + \dots + X_{C_n} \quad (2.30)$$

Sesuai dengan persamaan (2.25), diperoleh :

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (2.31)$$

Dari persamaan (2.31) dapat dilihat bahwa nilai kapasitor keseluruhan akan bertambah kecil bila dihubungkan secara seri. Sedangkan pada resistor dan induktor akan terdapat nilai yang lebih besar bila resistor-resistor ataupun induktor-induktor dihubungkan secara seri.



Gambar 11. Kapasitor dalam hubungan seri.

Seperti juga pada hubungan-hubungan seri lainnya, maka besar arus listrik yang mengalir pada setiap kapasitor sama besar. Sedangkan jumlah tegangan-tegangan yang terbentuk pada ujung-ujung tiap-tiap kapasitor sama dengan besar tegangan sumber, sesuai dengan persamaan (2.8).

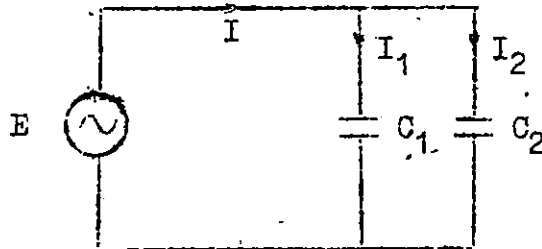
2. Bila beberapa kapasitor dihubungkan secara paralel, maka besar reaktansi kapasitip pengganti hubungan paralel adalah :

$$\frac{1}{X_{Cp}} = \frac{1}{X_{C1}} + \frac{1}{X_{C2}} + \frac{1}{X_{C3}} + \dots + \frac{1}{X_{Cn}} \quad (2.32)$$

Dan sesuai dengan persaaam (2.25), maka pada hubungan paralel ini diperoleh :

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (2.33)$$

Jadi dari persamaan (2.33) dapat dilihat bahwa nilai kapasitor akan bertambah besar bila kapasitor-kapasitor dihubungkan secara paralel. Hal ini berkebalikan dengan resistor dan induktor.



Gambar 12. Hubungan paralel kapasitor.

Besar arus induk/sumber sesuai dengan bentuk arus pada persamaan (2.10), di mana besar arus-arus induk sama dengan jumlah besar arus tiap-tiap cabang. Seperti juga sebuah induktor, maka sebuah kapasitor tentu juga mempunyai hambatan murni  $R_C$  yang dapat digambarkan dalam bentuk hubungan seri, sehingga nilai impedansi ialah :

$$Z = R_C - j X_C \quad (2.34)$$

yang dalam bentuk fasor adalah :

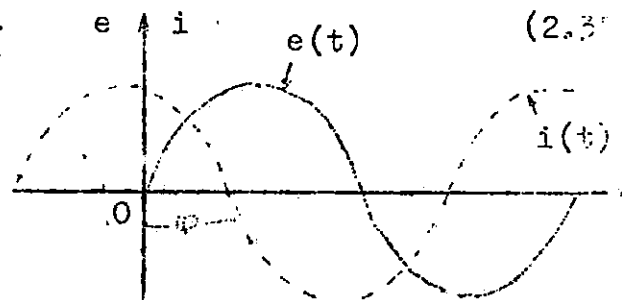
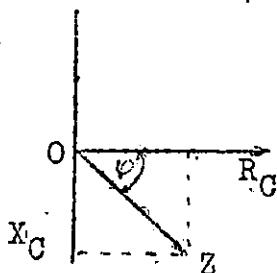
$$Z = Z \angle \varphi \quad (2.35)$$

di mana nilai besaran  $Z$  diperoleh dari :

$$Z = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} \quad (2.36)$$

sedangkan besar sudut phasa adalah , ditentukan dengan cara :

$$\tan \varphi = \frac{X_C}{R_C} \quad (2.37)$$

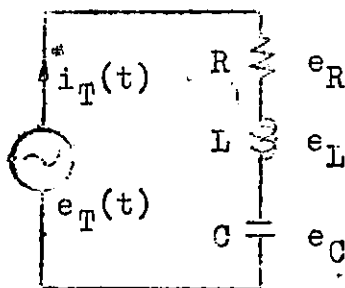


### E. HUBUNGAN SERI DAN PARALEL.

Di samping adanya pengaruh hambatan murni  $R$  pada suatu beban induktor ataupun kapasitor, maka mungkin pula terjadi hubungan-hubungan yang disengaja antara resistor  $R$ , induktor  $L$  dan kapasitor  $C$  baik dalam hubungan seri, paralel ataupun campuran. Untuk menyelesaikan persoalan-persoalan ini dapat digunakan prinsip :

#### 1. Hubungan seri RLC.

Karena pada hubungan seri yang sama adalah kuat arus maka dalam pemecahan persoalan ini prinsip bahwa tegangan total yang terbentuk di antara ujung-ujung seluruh beban merupakan penjumlahan masing-masing beban. Hal ini sesuai dengan persamaan (2.9) di muka.



Gambar 14. Beban seri.

Atau dapat juga ditentukan dengan persamaan umum :

$$e_T(t) = e_R(t) + e_L(t) + e_C(t) \quad (2.38)$$

di mana besar masing-masing tegangan bagian dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.5), (2.14) dan (2.28). Jika persamaan arus listrik adalah :

$$i_T(t) = I_{\max} \sin(\omega t + \theta_1) \text{ Ampere} \quad (2.39)$$

dan persamaan tegangan yang diperoleh :

$$e_T(t) = E_{\max} \sin(\omega t + \theta_2) \text{ Volt} \quad (2.40)$$

maka besar impedansi  $Z_T$  dapat ditentukan dengan :

$$\text{* nilai besaran : } Z_T = \frac{E_{\max}}{I_{\max}} \quad (2.41)$$

\* sedangkan beda fasa  $\varphi$ , dapat dicari dengan besar perbedaan sudut arus dengan sudut tegangan :

$$\varphi = \phi_2 - \phi_1 \quad (2.42)$$

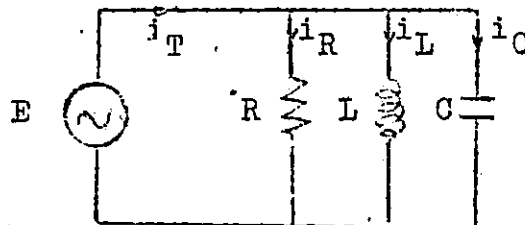
Sifat beban total dapat dilihat dari beda fasa ini :

- a.  $\varphi = 0 \rightarrow X_L = X_C$  beban resistip
- b.  $\varphi > 0^\circ$   $X_L > X_C$  beban induktip
- c.  $\varphi < 0^\circ$   $X_C > X_L$  beban kapasitip

## 2. Hubungan paralel RLC.

Karena pada hubungan paralel yang sama adalah tegangan, maka dalam memecahkan persoalan dalam hubungan paralel ini yang diperhatikan adalah besar arusnya. Secara umum dapat digunakan persamaan :

$$i_T(t) = i_R(t) + i_L(t) + i_C(t) \quad (2.43)$$



Gambar 15. Beban RLC paralel.

Seperti pada persamaan hubungan seri, maka nilai-nilai impedansi total  $Z_T$  dan sudut fasa dapat dapat ditentukan dengan persamaan (2.41) dan (2.42). Tetapi karena dalam hubungan paralel banyak bekerja dalam bentuk kebalikan, di mana :

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} \quad (2.44)$$

maka dapat digunakan pengertian admitansi, yang merupakan kebalikan dari nilai impedansi.

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (2.45)$$

Apabila  $Z = R + jX$  dan  $Y = G + jB$ , maka diperoleh hubungan :

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2} \quad (2.46)$$

$$B = \frac{-X}{R^2 + X^2} \quad (2.47)$$

$$R = \frac{G}{G^2 + B^2} \quad (2.48)$$

$$X = \frac{-B}{G^2 + B^2} \quad (2.49)$$

Maka persamaan (2.44) dapat diubah menjadi :

$$Y_T = Y_R + Y_L + Y_C \quad (2.50)$$

di mana :  $G =$  hantaran (conductance) (Siemen)

$B =$  suseptansi (susceptance) (Siemen)

Bila terdapat hubungan campuran, maka terlebih dahulu diselesaikan bagian serinya dulu, baru diselesaikan dengan cara paralel.

Contoh 1.

1. Sebuah rangkaian seri RLC seperti tergambar dengan :

$e(t) = 353,5 \cos(3000t - 10^\circ)$  Volt dan

$i_s(t) = 12,5 \cos(3000t - 55^\circ)$  Ampere

Bila nilai induktansi  $L = 10$  mH

Tentukanlah : 1. Beda fasa dan arus

2. Impedansi total beban

3. Nilai resistor R dan kapasitor C.



Penyelesaian :

1. Sesuai dengan persamaan (2.42) diperoleh besar beda phasa :

$$\varphi = -10^\circ - (-55^\circ) = 45^\circ$$

Jadi besar beda phasa  $\varphi = 45^\circ$ .

Dengan sifat beban induktif, arus tertinggal.

2. Nilai besaran impedansi dapat dicari dengan menggunakan persamaan (2.41) :

$$Z = \frac{353,5}{12,5} = 28,28 \text{ Ohm.}$$

Sehingga besar impedansi  $Z = 28,28 \angle 45^\circ \text{ Ohm.}$

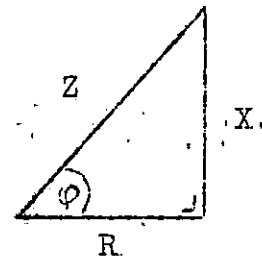
3. Besar nilai  $X = X_L - X_C$

$$= Z \sin \varphi$$

Sesuai dengan persamaan (2.11) dan (1.11), maka :

$$X_L = 3000 \times 10 \times 10^{-3}$$

$$= 30 \text{ Ohm.}$$



Dari gambar diperoleh :

$$R = Z \cos \varphi = 20 \text{ Ohm.}$$

Sehingga besar nilai resistor  $R = 20 \text{ Ohm.}$

Dari gambar juga di dapat :

$$X = Z \sin \varphi = 20 \text{ Ohm}$$

Sedangkan  $X = X_L - X_C$ , sehingga  $X_C = 10 \text{ Ohm.}$

Maka sesuai dengan persamaan (2.25) dan (1.11) diperoleh besar nilai kapasitor  $C = 33,33 \mu\text{F}$

Contoh 2.

Tiga buah elemen murni masing-masing  $R = 20 \text{ Ohm}$ ,  $L = 1,6 \text{ mH}$  dan kapasitor  $C = 20 \mu\text{F}$  dihubungkan secara paralel, dimana ketiga beban paralel ini diberi tegangan dengan persamaan :  $e(t) = 50 \sin (5000.t + 45^\circ) \text{ Volt}$

- Carilah :
- Masing-masing arus cabang.
  - Arus sumber total.
  - Impedansi total dari beban.

Jawab :

- a. Perhatikanlah gambar 15 pada halaman 27.

Besar arus cabang resistor ditentukan dengan persamaan (2.6), sehingga diperoleh :

$$i_R(t) = 2,5 \sin ( 5000 t + 45^\circ ) \text{ Ampere.}$$

Besar arus cabang pada induktor ditentukan dengan persamaan (2.15), maka diperoleh :

$$i_L(t) = - 6,25 \cos ( 5000 t + 45^\circ ) \text{ Ampere.}$$

Sedangkan besar arus cabang pada kapasitor dapat ditentukan dengan persamaan (2.29), yaitu :

$$i_C(t) = 5 \cos ( 5000 t + 45^\circ ) \text{ Ampere.}$$

- b. Besar arus total  $i_T(t)$  dapat dicari dengan menggunakan persamaan (2.43), sehingga :

$$\begin{aligned} i_T(t) &= 2,5 \sin ( 5000 t + 45^\circ ) + - 1,25 \cdot \cos \\ &\quad ( 5000 t + 45^\circ ) \text{ Ampere.} \\ &= 2,8 \sin ( 5000 t + 18^\circ 24' ) \text{ Ampere.} \end{aligned}$$

(menentukan nilai-nilai  $i_T(t)$  dengan terlebih dahulu menyamakan bentuk persamaan ke bentuk sin atau cos, lalu diselesaikan dengan sifat menjumlahkan dengan cara bilangan kompleks pada bab 1).

- c. Menentukan besar nilai impedansi, digunakan persamaan (2.41), sehingga :

$$Z = 3 \text{ Ohm}$$

Sedangkan beda fasa dicari dengan persamaan (2.42) :

$$\varphi = 45^\circ - 18^\circ 24' = 26^\circ 36'$$

Jadi besar impedansi total  $Z = \underline{26^\circ 36'}$  Ohm.

Soal-soal.

- Sebuah resistor  $R = 5 \text{ Ohm}$  dihubungkan seri dengan induktor  $L = 0,06 \text{ Henry}$  dan tegangan yang terbentuk pada ujung-ujung induktor adalah  $e_L(t) = 15 \sin 200 t \text{ Volt}$ .

Tentukanlah :

- persamaan arus ( $i = 1,25 \sin (200 t - 90^\circ)$  Ampere.
- persamaan tegangan total ( $e = 16,25 \sin (200 t - 22^\circ 21'$

2. Dua elemen murni dihubungkan secara seri dan ternyata persamaan :

$$e_T(t) = 150 \sin (500 t + 10^\circ) \text{ Volt.}$$

$$i_T(t) = 13,42 \sin (500 t - 53^\circ 24') \text{ Ampere}$$

Tentukanlah nilai kedua elemen:

$$(R = 5 \text{ Ohm. } L = 0,02 \text{ H}).$$

3. Berdasarkan gambar rangkaian di bawah ini, tentukanlah:

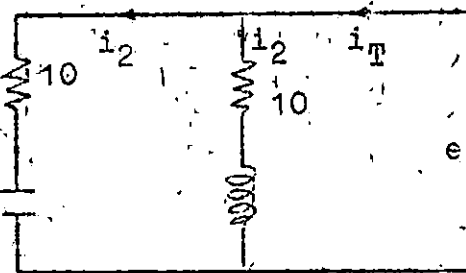
a. arus cabang.

$$(i_1 = 7,07 \sin (5000 t - 45^\circ) \text{ Ampere})$$

$$(i_2 = 7,07 \sin (5000 t + 45^\circ) \text{ Ampere})$$

b. Arus total ( $i_T = 10 \sin 5000 t$  Ampere)

c. Impedansi total ( $Z = 10 \angle 0^\circ$  Ohm).



$$e(t) = 100 \sin 5000 t$$

## F. DAYA DAN FAKTOR DAYA.

Di dalam teknik arus searah, besarnya daya listrik yang digunakan suatu beban atau suatu rangkaian listrik merupakan perkalian tegangan dengan arus ( $P = E \times I$ ). Dasar pokok pernyataan ini juga berlaku dalam listrik arus bolak-balik, hanya saja berlaku untuk keadaan sesaat, yaitu :

$$p(t) = e(t) \times i(t) \quad (2.51)$$

di mana :

- $p$  = daya sesaat (Watt).
- $e$  = tegangan sesaat (Volt).
- $i$  = arus listrik sesaat (Ampere).

Nilai daya sesaat  $p$  ini dapat dinyatakan dalam arté positif atau negatif. Dikatakan daya bernilai positif bila daya dipindahkan dari sumber ke pemakai (beban). Dan sebaliknya daya dikatakan bernilai negatif bila dipindahkan dari pemakai ke beban. Cesara umum daya rata-rata  $P_{av}$  dapat diperoleh dari :

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int p dt \quad (2.52)$$

dengan pengertian :

- $P_{av}$  = daya rata-rata (Watt)
- $p$  = daya sesaat (Watt)
- $T$  = waktu periodik (detik)

Batas pengambilan integral dapat juga diambil dalam batas setengah gelombang ( $0 - \pi$ ). Kalau diperhatikan dari keadaan beban sebenarnya ada dua jenis beban yakni beban di mana arus dan tegangan berbeda fasa.

### 1. Arus dan tegangan sephasa.

Ini berarti bahwa beban merupakan beban resistip  $R$ .

Bila :  $i(t) = I_{mak} \sin \omega t$  Ampepe.

$e(t) = E_{mak} \sin \omega t$  Volt.

Maka sesuai dengan persamaan (2.51) dan (2.52), diperoleh besar daya rata-rata  $P_{av}$  beban hambatan murni sebesar :

$$P_{av} = \frac{1}{2} (E_{mak} \cdot I_{mak}) \quad (2.53)$$

Dan sesuai pula dengan persamaan (1.8) dan (1.10) juga diperoleh daya P :

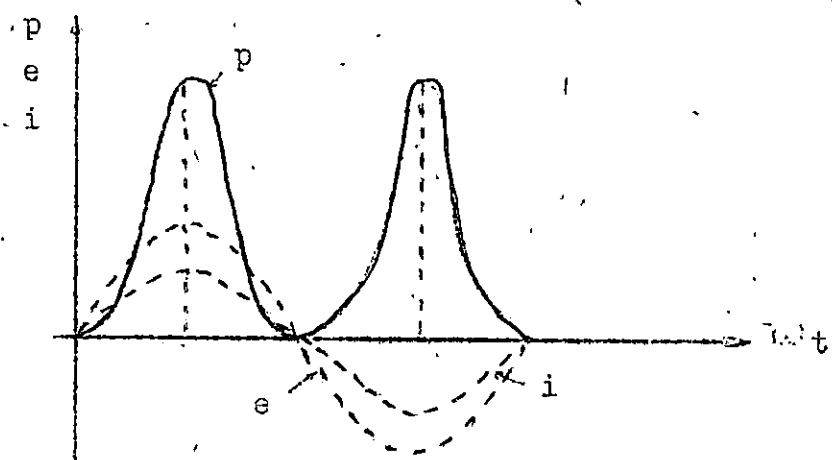
$$P_e = E \times I \quad (2.54)$$

di mana : P = daya efektif (Watt).

E = tegangan efektif (Volt).

I = arus efektif (Ampere).

Kalau digambarkan, maka daya yang terdapat pada suatu beban hambatan murni R, adalah seperti gambar 16 di bawah ini.



Gambar 16. Daya pada rangkaian hambatan murni R.

Dari gambar dapat dilihat bahwa frekuensi dari daya adalah dua kali frekuensi arus atau tegangan. Disamping itu nilai tegangan senantiasa positif yang besarnya berubah-ubah dari nilai 0 sampai maksimum  $E_{mak} \cdot I_{mak}$ .

2. Arus dan tegangan berbeda fasa.

Dalam hal ini beban mungkin merupakan induktor murni, kapasitor murni atau mungkin juga merupakan hubungan seri maupun paralel dari ketiga jenis beban RLC. Namun demikian ternyata kelak bahwa bentuk daya efektif pada

da rangkaian tersebut sama saja. Untuk ini misalkan di-ambil beban merupakan induktor murni  $L$ . Jadi bila :

$$i(t) = I_{\text{mak}} \sin \omega t \text{ Ampere.}$$

$$e(t) = E_{\text{mak}} \sin (\omega t + \varphi) \text{ Volt,}$$

maka sesuai dengan persamaan (2.51) dan (2.53), diperoleh besar daya rata-rata pada beban :

$$P_{\text{av}} = \frac{1}{2} ( E_{\text{mak}} \cdot I_{\text{mak}} ) \cos \varphi \quad (2.55) \quad (8)$$

Dan sesuai pula dengan persamaan (1.8) dan (1.10) diperolehlah besar daya  $P$  yaitu :

$$P = E \cdot I \cos \varphi \quad (2.56)$$

di mana :

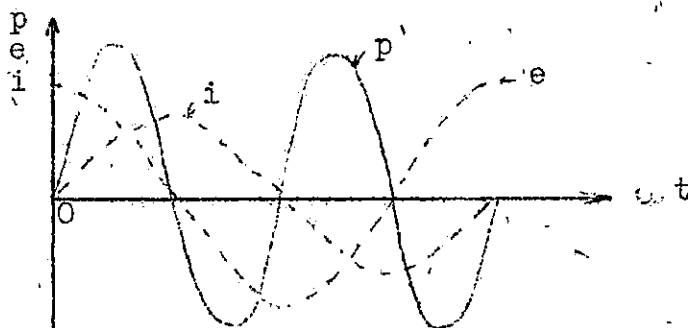
$P$  = daya efektif (Watt).

$E$  = tegangan efektif (Volt).

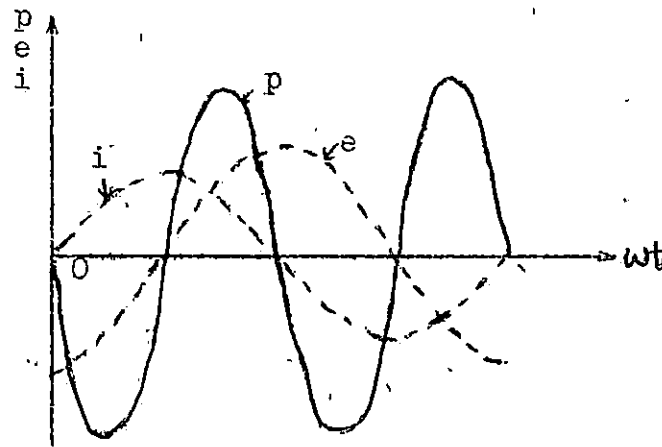
$I$  = kuat arus efektif (Ampere).

$\varphi$  = beda fasa arus dan tegangan (derajat).

Gambar 17 di bawah ini memperlihatkan penggambaran sistem daya pada suatu induktor murni. Di mana frekuensi daya dua kali frekuensi tegangan atau arus dan daya pada suatu saat positif dan pada saat lainnya negatif. Jadi untuk satu gelombang sempurna, besar daya efektif pada rangkaian tersebut adalah nol. Demikian pula halnya pada rangkaian kapasitor murni  $C$ , di mana terjadi penyimpanan/pemakaian daya dan pelepasan/pengembalian daya secara bergantian. Perhatikanlah gambar 18 di bawah ini.



Gambar 17. Daya pada beban induktor murni.



G.b.e.

Gambar 18. Beban pada kapasitor murni.

Dari persamaan (2.56) dapat dilihat bahwa dalam persamaan tersebut terdapat suatu faktor, yakni  $\cos$  yang disebut faktor daya rangkaian. Hal ini ditimbulkan karena adanya perbedaan fasa antara arus dan tegangan. Karena itu sebenarnya dalam rangkaian listrik arus bolak-balik terdapat pula bentuk-bentuk daya, sesuai dengan bentuk/jenis beban, yang akan membentuk segitiga daya sebagai berikut:

1. Daya seluruhnya (apparent power)  $S$ , yang besarnya :

$$\begin{aligned} S &= E \cdot I \text{ Volt-Ampere (VA)} & (2.57) \\ &= P \pm i Q \text{ VA} \end{aligned}$$

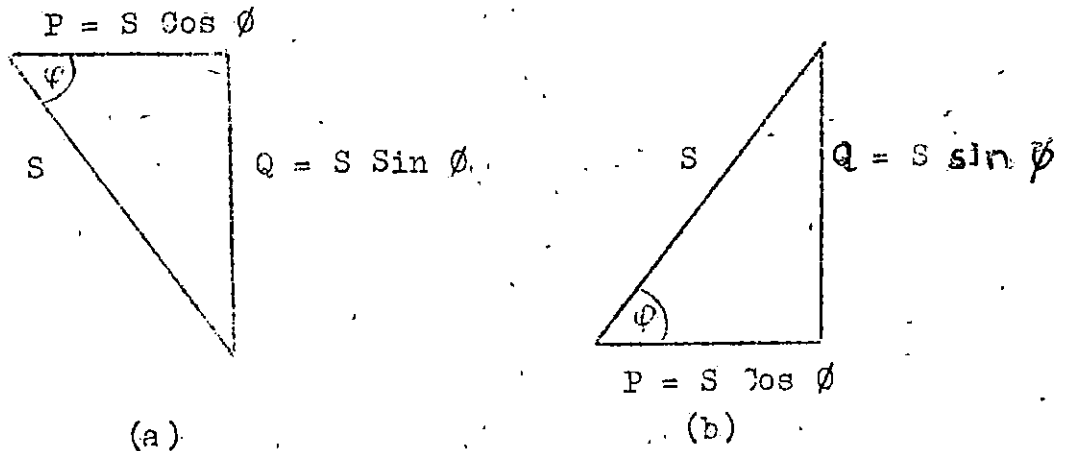
2. Daya sesungguhnya (average power)  $P$ , yang besarnya :

$$\begin{aligned} P &= S \cos \phi \text{ Watt.} & (2.58) \\ &= R_e E \cdot I \text{ Watt.} \end{aligned}$$

3. Daya reaktif (reactive power)  $Q$ , yang besarnya :

$$\begin{aligned} Q &= S \sin \phi \text{ Volt Ampere reaktif} & (2.59) \\ &= I_m E \cdot I \text{ VAR} \end{aligned}$$

Besar faktor daya mungkin lagging atau leading, tergantung daripada sifat beban, yang kalau digambarkan segitiga dayanya akan terdapat seperti gambar 19 di bawah ini.



Gambar 19. a). Segitiga daya pada beban induktip.

b). Segitiga daya pada beban kapasitip.

Jadi dapat dilihat bahwa penggambaran daya terbalik dari sistem impedansi beban.

Dari keterangan di atas dapat dilihat, bahwa secara umum terdapat perbedaan-perbedaan pengertian daya antara listrik arus searah dengan arus bolak-balik, dimana ditentukan oleh besarnya faktor daya (pf) cas.

Contoh I.

Pada suatu rangkaian listrik terdapat persamaan tegangan yakni :

$e(t) = 150 \sin(\omega t + 10^\circ)$  Volt  
dan persamaan arus :-

$i(t) = 5 \sin(\omega t - 50^\circ)$  Ampere.

Tentukanlah besar sistem segitiga dayanya .

Penyelesaian :



Dari persamaan-persamaan di atas diperoleh :

$$E = 106 \angle 10^\circ \text{ Volt} \quad I = 3,54 \angle -50^\circ \text{ Ampere.}$$

Sehingga dengan persamaan (2.57), diperoleh :

$$\begin{aligned} S &= (106 \angle 10^\circ)(3,54 \angle -50^\circ) \\ &= 375 \angle 60^\circ \text{ VA.} \\ &= 187,5 + j 325 \text{ VA.} \end{aligned}$$

Dengan sendirinya diperoleh pula :

$$P = 187,5 \text{ Watt.}$$

$$Q = 325 \text{ VAR arus tertinggal.}$$

Contoh II.

Dua rangkaian beban murni dihubungkan secara seri yang mempunyai daya 940 Watt dengan faktor kerja 0,707 arus mendahului. Dan tegangan sumber yang diberikan :

$$e(t) = 99 \sin (6000 t + 30^\circ) \text{ Volt.}$$

Tentukanlah besar masing-masing elemen.

Jawab : Dari data-data diperoleh :

$$P = 940 \text{ Watt.} \quad E = 70 \angle 30^\circ \text{ Volt.}$$

Sesuai dengan persamaan (2.56), diperoleh :

$$940 = 70 \times I \times 0,707 \longrightarrow I = 19 \text{ Ampere.}$$

Sedangkan besar beda fasa  $\varphi = \cos^{-1} 0,707 = 45^\circ$

Maka sesuai dengan persamaan (2.42), diperolehlah harga arus  $I = 19 \angle 75^\circ$  Ampere.

Sesuai dengan persamaan (2.4) diperoleh impedansi  $Z$

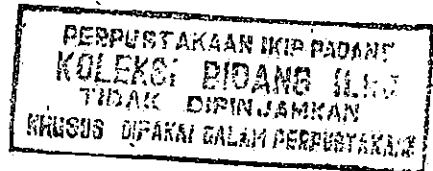
$$\begin{aligned} Z &= \frac{70 \angle 30^\circ}{19 \angle 45^\circ} = 3,68 \angle -45^\circ \text{ Ohm} \\ &= (2,6 - j 2,6) \text{ Ohm.} \end{aligned}$$

Berarti harga  $R = 2,6 \text{ Ohm.}$

Dan nilai kapasitor ditentukan dengan persamaan (2.25)

$$C = \frac{1}{6000 (2,6)} = 64,1 \text{ MF.}$$

BAB III  
RESONANSI.



A. PENGERTIAN.

Sebagaimana telah dipelajari bahwa pada umumnya pada suatu rangkaian RLC yang diberi tegangan tertentu atau dialiri arus listrik bolak-balik, maka antara tegangan dan arus terdapat perbedaan sudut fasa. Suatu resonansi (turut bergetar) akan terjadi bila antara tegangan yang dimasukkan dan arus yang mengalir ke dalam keadaan satu fasa dengan kata lain beda fasa arus dan tegangan nol. Tentu saja hal ini akan dicapai untuk nilai-nilai tertentu dari beban yang dilayani, yang pada dasarnya tergantung pada nilai induktor L dan kapasitor C.

- Jadi pada suatu beban yang terdapat resonansi, maka
- Arus dan tegangan sephas.
  - Faktor daya beban  $pf = 1$ .
  - Impedansi rangkaian Z sama dengan nilai tahanan R.
  - Nilai-nilai imagnir sama dengan nol.

Karena adanya dua jenis hubungan beban, yakni seri dan paralel; maka dikenal pula dua jenis rangkaian resonansi.

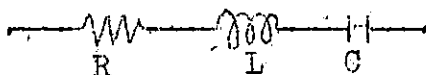
B. RESONANSI SERI.

Pada suatu rangkaian RLC yang dihubungkan seri, maka besar impedasni seluruhnya adalah :

$$Z = R + j ( X_L - X_C ) \quad (3.1)$$

Seperti dikatakan di muka bahwa bila terjadi suatu resonansi, maka bilangan khyalnya sama dengan nol. Maka sesuai dengan persamaan (3.1), diperoleh :

$$X_L - X_C = 0 \quad \longrightarrow \quad X_L = X_C \quad (3.2)$$



Gambar 20. RLC seri.

Sesuai dengan persamaan (2.11) dan (2.25), diperoleh :

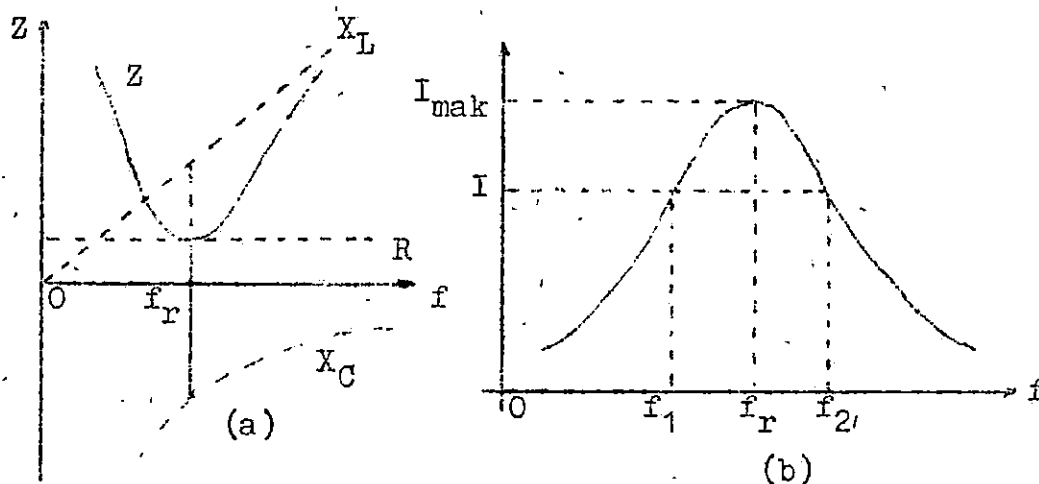
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.3)$$

di mana :  $f_r$  = frekuensi resonansi hubungan seri(Hz).

L = nilai induktor (Henry)

C = nilai kapasitor (Farad)

Karena pada saat terjadinya resonansi seri nilai impedansi  $Z = R$ , yang berarti merupakan nilai impedansi terkecil maka pada saat resonansi ini terdapat aliran arus listrik yang paling besar (sesuai dengan persamaan (2.4). Dengan kata lain, pada saat resonansi seri, maka pemakaian arus listrik sebesar-besarnya. Perhatikanlah gambar di bawah ini.



Gb.21. a. Impedansi fungsi frekuensi.  
b. Arus fungsi frekuensi.

Dari gambar 21 terlihat bahwa pada saat frekuensi di bawah frekuensi resonansi  $f_r$  maka reaktansi induktip lebih kecil dari pada reaktansi kapasitip. Dan sebaliknya pada saat frekuensi di atas frekuensi resonansi  $f_r$ , maka reaktansi induktip lebih besar dari reaktansi kapasitip.

Pada gambar 21 b dapat dilihat bahwa bila arus maksimum pada saat resonansi adalah  $I_r$ , maka besar arus efektif  $I$  pada saat resonansi tersebut adalah se-

besar  $I = 0,707 I_r$  (perhatikan kembali persamaan (1.10)). Di sini dapat dilihat pada saat resonansi ini maka terdapat nilai-nilai frekuensi yang terdapat antara  $f_2$  dan  $f_1$ . Besar frekuensi ini disebut lebar ban (bandwidth) yang sering ditandai dengan simbol BW. Dengan kata lain:

$$BW = f_2 - f_1 \quad (3.4)$$

di mana :  $BW =$  lebar ban (Hz).

$f_2 =$  frekuensi terbesar pada saat resonansi pada besar arus efektif (Hz)

$f_1 =$  frekuensi terkecil pada saat resonansi pada besar arus efektif (Hz)

Lebar ban BW akan semakin kecil bila nilai hambatan murni R semakin rendah.

### C. RESONANSI PARALEL.

Bila masing-masing beban murni RLC dihubungkan secara paralel, seperti pada gambar 22 yang merupakan penggambaran dalam nilai-nilai admitansinya. Di mana secara umum admitansi rangkaian adalah :

$$Y = G + j ( B_C - B_L ) \quad (3.5)$$

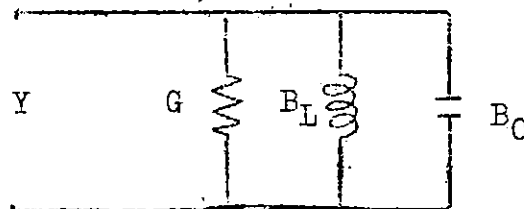
di mana :

$Y =$  admitansi (Siemen)

$G =$  konduktansi (Siemen)

$B_L =$  suseptansi induktif (Siemen)

$B_C =$  suseptansi kapasitif (Siemen)



Gambar 22. Hubungan paralel.

Sesuai dengan hubungan seri, maka resonansi terjadi pada saat bagian imajiner = nol. Ini berarti :

$$B_C = B_L \longrightarrow \frac{1}{X_C} = \frac{1}{X_L} \quad (3.6)$$

Dan sesuai dengan persamaan (2.11) dan (2.5), diperoleh

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.7)$$

Jadi secara umum besar frekuensi resonansi pada hubungan seri dan hubungan paralel mempunyai bentuk yang sama. Hanya besar admitansi pada hubungan paralel sewaktu terjadinya resonansi merupakan nilai yang terbesar, yakni :

$$Y = G \quad (3.8)$$

Ini berarti bahwa besar impedansi resonansi paralel akan sebesar-besarnya, yang akibatnya besar arus digunakan pada saat resonansi paralel merupakan arus yang sekecil-kecilnya.

Sebagaimana telah dipelajari, bahwa sebenarnya suatu jenis beban tertentu tidak mempunyai nilai-nilai yang murni. Dan dari persamaan-persamaan dapat dilihat bahwa besar frekuensi resonansi hanya tergantung pada nilai komponen L dan C. Maka secara umum rangkaian resonansi paralel dapat diubah menjadi bentuk seperti pada gambar 23 di mana :

$$Y = Y_L + Y_C \quad (3.9)$$

di mana:

$$\begin{aligned} Y &= \text{admitansi seluruhnya} && (\text{Mho}) \\ Y_L &= \text{admitansi induktor} && (\text{Mho}) \\ Y_C &= \text{admitansi kapasitor} && (\text{Mho}) \end{aligned}$$

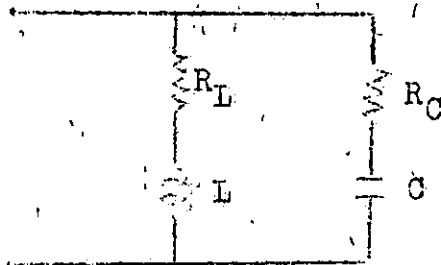
Apabila nilai-nilai  $Y_L$  dan  $Y_C$  diganti dengan nilai-nilai rangkaianannya, serta disesuaikan dengan syarat terjadinya

resonansi, maka diperoleh besaran resonansi sebesar :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \times \sqrt{\frac{R_L^2 - \frac{L}{C}}{R_C^2 - \frac{L}{C}}} \quad (3.10)$$

di mana :

- $f_r$  = frekuensi resonansi paralel (Hz)
- $L$  = induktansi dari induktor (Henry)
- $R_L$  = hambatan dari induktor (Ohm)
- $R_C$  = hambatan dari kapasitor (Ohm)
- $C$  = kapasitansi dari kapasitor (Farad)



Gambar 23. Resonansi paralel.

Terlihat bahwa frekuensi resonansi pada persamaan dari (3.10) mempunyai faktor perbedaan dengan persamaan dari (3.7), sebesar :

$$\sqrt{\frac{R_L^2 - \frac{L}{C}}{R_C^2 - \frac{L}{C}}}$$

di mana faktor perbedaan ini dapat diabaikan, atau dengan kata lain dapat dianggap = 1, bila faktor kualitas masing-masing kapasitor dan induktor realtip besar.

#### D. FAKTOR KWALITAS.

Yang dimaksud dengan faktor kualitas (Q) dari suatu induktor atau kapasitor adalah :

$$Q = \frac{\text{tenaga maksimum yang dapat disimpan}}{\text{tenaga yang terbuang setiap gelombang}} \times 2\pi \dots\dots\dots(3.11)$$

Besar tenaga yang dapat disimpan suatu induktor :

$$A_L = \frac{1}{2} L I_{\text{mak}}^2 \quad (3.12)$$

Sedangkan yang dapat disimpan sebuah kapasitor :

$$A_C = \frac{1}{2} C E_{\text{mak}}^2 \quad (3.13)$$

Di mana tenaga yang terbuang pada masing-masing hambatannya tiap gelombang adalah :

$$A_R = \frac{1}{2} I_{\text{mak}}^2 R \frac{1}{f} \quad (3.14)$$

Sehingga besar faktor kualitas Q dari suatu alat dapat ditentukan sesuai dengan persamaan (3.11), dengan memasukkan nilai-nilai yang diketahui seperti di atas di mana :

1. Faktor kualitas RL seri :

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad (3.15)$$

2. Faktor kualitas RC seri :

$$Q = \frac{X_C}{R} \quad (3.16)$$

3. Faktor kualitas pada rangkaian seri RLC pada resonansi terjadi pada tegangan kapasitor maksimum dan arus induktor = nol, atau sebaliknya, jadi :

$$Q_r = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} \quad (3.17)$$

4. Bila RLC dalam hubungan paralel, maka besar faktor kualitas pada saat resonansi adalah pada saat arus induktor maksimum dan tegangan kapasitor nol, atau sebaliknya, jadi :

$$Q_r = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C} \quad (3.18)$$

Pada umumnya nilai hambatan suatu kapasitor relatif sangat kecil, sehingga umumnya dapat diabaikan bila dibandingkan terhadap nilai reaktansi kapasitif dari kapasitor tersebut. Sehingga biasanya dapat langsung diabaikan. Umumnya pula yang perlu diperhatikan adalah nilai hambatan R dari suatu induktor L.

Dengan adanya pengertian faktor kualitas ini, dari suatu rangkaian resonansi, maka besar faktor kualitas, lebar ban dan frekuensi dari suatu rangkaian mempunyai hubungan pula, yakni :

$$Q_r = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \quad (3.19)$$

di mana :

$Q_r$  = faktor kualitas pada saat resonansi

$f_2 - f_1$  = lebar ban (hz).

$f_r$  = frekuensi resonansi. (hz).

Di samping itu antara frekuensi resonansi dan lebar ban terdapat pula hubungan dalam bentuk :

$$f_r = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad (3.20)$$

Contoh.

Sebuah induktor  $L = 14 \mu\text{H}$  yang mempunyai kualitas dengan  $q = 100$  dihubungkan paralel dengan kapasitor  $C = 32,2 \text{ pF}$ .



Tentukanlah :

1. Frekuensi resonansi rangkaian penala.
2. Panjang gelombang frekuensi resonansi.
3. Impedansi pada saat resonansi.
4. Hambatan efektif dari induktor.
5. Besar daya pada rangkaian pada saat resonansi diberi tegangan 100 Volt.

Jawab :

1. Besar frekuensi resonansi dapat ditentukan dengan persamaan umum, yakni persamaan (3.7), sehingga :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{14 \times 10^{-6} \times 32,2 \times 10^{-12}}}$$

$$= 7495975,86 \text{ Hz}$$

$$= 7,5 \text{ MHz}$$

2. Untuk menentukan panjang gelombang dari suatu frekuensi dapat ditentukan dengan persamaan :

$$f = \frac{3 \times 10^8}{\lambda}$$

dengan arti :  $f$  = frekuensi (Hz).

$\lambda$  = panjang gelombang (meter).

Jadi diperoleh panjang gelombang, sesuai dengan persamaan (3.21) yaitu :

$$\lambda = 40,02 \text{ meter.}$$

3. Untuk mencari besarnya hambatan efektif dari kumpulan dapat digunakan persamaan (3.15) yang digabung dengan persamaan (3.7), sehingga diperoleh :

$$R = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.22)$$

Sehingga berdasarkan nilai-nilai yang diketahui, di perolehlah besar hambatan efektif kumparan R yaitu 6,99 Ohm.

4. Besar impedansi rangkaian paralel ini, dapat ditentukan dengan persamaan :

$$Z_r = \frac{L}{C R} \quad (3.23)$$

Sehingga diperolehlah  $Z_r = 65976,12 \angle 0^\circ$  Ohm.

5. Daya pada saat resonansi besarnya adalah :

$$P = I^2 \cdot Z_r \quad \text{ataupun} \quad P = \frac{E^2}{Z_r} \quad (3.24)$$

Ini berarti bahwa daya pada resonansi,  $P = 15,17$  W.

## DAFTAR KEPUSTAKAAN

Alex Romanowitz, H., Intruduction to Electric Circuits, John Wiley & Sons, Inc, New York, London, Sydney, Toronto, Topan Company Ltd, Tokyo, Japan, 1971.

Francis Weston Sears and Zemansky Mark.W., College Physics, Third Edition, Japan Publications Trading Company. Ltd, Tokyo, Japan, 1962.

Kuznotzov, M., Fundamentals of Electrical Engineering, Peace Publisher, Moscow.

Mismail Budiono; Rangkaian Listrik, Jilid I, <sup>II</sup> Lembaga Penerbit Universitas Brawijaya, Malang, 1981.

Rangkaian Listrik, Jilid II, Lembaga Penerbitan Universitas Brawijaya, Malang, 1981.

Mc Kenzie Smith I and Hoise K.T., Basic Electrical Engineering Science, Longman Group Limited, London, Fouth Impression, 1980.

Vincent Del Toro., Principles of Electrical Engineering, Prantice Hall of India Privare Limited, New Delhi, 1975, Second Edition.