



GRAHA ILMU



PENGANTAR Teknik Elektro

PUSTAKAAN
ARSIPAN
AWA TIMUR

381

UD

1

Budi Astuti



GRAHA ILMU

PENGANTAR
**Teknik
Elektro**

Budi Astuti

PENGANTAR TEKNIK ELEKTRO

Oleh : Budi Astuti

Edisi Pertama

Cetakan Pertama, 2011

362.7076 / BPE / P / 2012.

Hak Cipta © 2011 pada penulis,
Hak Cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apa pun, secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya, tanpa izin tertulis dari penerbit.



GRAHA ILMU

Ruko Jambusari No. 7A

Yogyakarta 55283

Telp. : 0274-889836; 0274-889398

Fax. : 0274-889057

E-mail : info@grahailmu.co.id

Astuti, Budi

PENGANTAR TEKNIK ELEKTRO/Budi Astuti

-Edisi Pertama - Yogyakarta; Graha Ilmu, 2011
x + 190 hlm, 1 Jil. : 23 cm.

ISBN: 978-979-756-725-5

1. Teknik

I. Judul

Kata Pengantar

Puji syukur ke hadirat Allah SWT, penulisan buku PENGANTAR TEKNIKELEKTRO ini akhirnya dapat terselesaikan. Buku ini disusun berdasar berbagai bacaan dan dituliskan dalam bahasa sederhana dengan harapan dapat memberikan pengetahuan dasar tentang Teknik Elektro agar menarik minat bagi mereka yang baru mulai belajar dalam bidang keteknikan Elektro.

Dengan selesainya buku ini, diucapkan terimakasih kepada berbagai pihak antara lain Bapak Tito Yuwono ST., MSc serta Ibu Dwi Ana Ratna Wati ST., MEng. selaku Ketua Jurusan serta Sekretaris Jurusan di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Ull yang telah mendorong dan memberi semangat. Ucapan terima kasih juga kepada pihak keluarga terdekat Ir. Subagio MSc., DR. Gea O.F.P.,ST.,MSc., DR. Indraswari K.,ST.,MSc., Indrasatya K., ST.MSc., Yudhanti Adhitarini STP., Ibunda S. Soewirjo, serta cucunda Naureen Hanifa Parikesit yang senantiasa memberikan dukungan moral dan doa, dan tidak lupa terima kasih untuk Civitas Akademika Universitas Islam Indonesia khususnya Jurusan Teknik Elektro dan Jurusan Teknik Industri yang telah memberi inspirasi atas penulisan buku ini.

Sangat disadari masih banyak kekurangan ataupun penjelasan yang seharusnya masih dapat ditambahkan dalam penulisan buku ini. Oleh karena itu, diharapkan saran dan kritik guna penyempurnaan di masa mendatang.

Yogyakarta, Januari 2011

Penulis

Daftar Isi

KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
BAB I SISTEM SATUAN DAN HUKUM-HUKUM DASAR	1
1.1 Sistem Satuan	4
1.2 Definisi-definisi	5
1.3 Daftar Pustaka	24
BAB II ELEMEN-ELEMEN RANGKAIAN	27
2.1 Elemen Aktif	28
2.2 Tegangan Acuan, <i>Ground</i>	36
2.3 Rangkaian Terhubung Buka dan Terhubung Tutup	36
2.4 Elemen Pasif	38
2.5 Daftar Pustaka	51
BAB III UNTAI LISTRIK	53
3.1 Definisi Untai Listrik	54
3.2 Topologi Jaringan	55
3.3 Penggunaan Alat Ukur	56
3.4 Hukum Kirchoff	57
3.5 Kombinasi Hubungan Resistansi	63
3.6 Konversi Sumber	70

3.7 Sumber Tak Bebas Atau Sumber Terkontrol	73	7.5 Daya Arus Bolak Balik dan Faktor Daya	163
3.8 Daftar Pustaka	77	7.6 Daftar Pustaka	174
BAB IV PENGENALAN SINYAL	79	BAB VIII PENGANTAR SISTEM KONTROL	175
4.1 Berbagai Jenis Sinyal	80	8.1 Definisi Sistem	177
4.2 Modulasi	82	8.2 Respon Sistem	178
4.3 Persamaan Matematis Sebuah Sinyal	83	8.3 Fungsi Alih	179
4.4 Harga Rata-rata dan Harga Efektif/harga Rms	87	8.4 Manipulasi Blok Diagram	182
4.5 Sinyal Arus Bolak-balik (<i>Alternating Current</i>)	92	8.5 Daftar Pustaka	187
4.6 Fasor	97	TENTANG PENULIS	189
4.7 Aljabar Fasor	102		
4.8 Daftar Pustaka	105	-oo0oo-	
BAB V RANGKAIAN PENGOLAH SINYAL	107		
5.1 Penyearah (<i>Rectifier</i>) dan Filter	111		
5.2 Clipping dan Clamping.	117		
5.3 Diferensiator dan Integrator	120		
5.4 Penguat (<i>Amplifier</i>) dan Penguat Operasional (<i>Opamp</i>)	123		
5.5 Daftar Pustaka	125		
BAB VI INDUKSI ELEKTROMAGNETIS	127		
6.1 Medan Magnet dan Rangkaianannya	128		
6.2 Hukum Faraday	133		
6.3 Rangkaian Ekuivalen Magnet	134		
6.4 Prinsip Elektromekanis	136		
6.5 Transformator	138		
6.6 Pembangkitan Tegangan Induksi	142		
6.7 Daftar Pustaka	146		
BAB VII RANGKAIAN ARUS BOLAK-BALIK	149		
7.1 Tegangan dan Arus Bolak-Balik	150		
7.2 Arus Bolak-balik pada Elemen Pasif	150		
7.3 Impedansi dan Admitansi	157		
7.4 Resonansi	162		

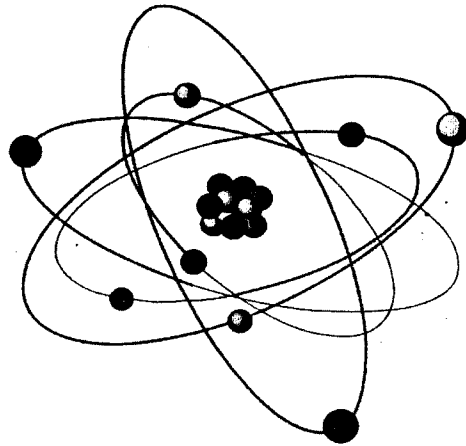
Sistem Satuan dan Hukum-hukum Dasar

Teknik Elektro (*Electrical Engineering*) adalah keilmuan yang membahas bagaimana energi dan informasi dapat diproses dengan baik. Kebutuhan dan pemanfaatan energi dan informasi akan sangat mempengaruhi kehidupan sehingga “listrik” adalah energi yang tidak dapat lepas dari kehidupan manusia.

Ada dua sifat listrik:

- Listrik Statis – tidak ada gerakan dari muatan bebas
- Arus Listrik - gerakan dari muatan bebas, dengan dua jenis:
 - » Arus Searah (*Direct Current* atau DC)
 - » Arus bolak balik (*Alternating Current* atau AC)

Listrik dibangkitkan oleh gerakan sebuah muatan yang sangat kecil dari zarah atom yang disebut elektron dan proton. Lihat gambar 1.1 Orbit elektron mengelilingi inti yang terdiri atas proton dan neutron yang sifatnya netral.

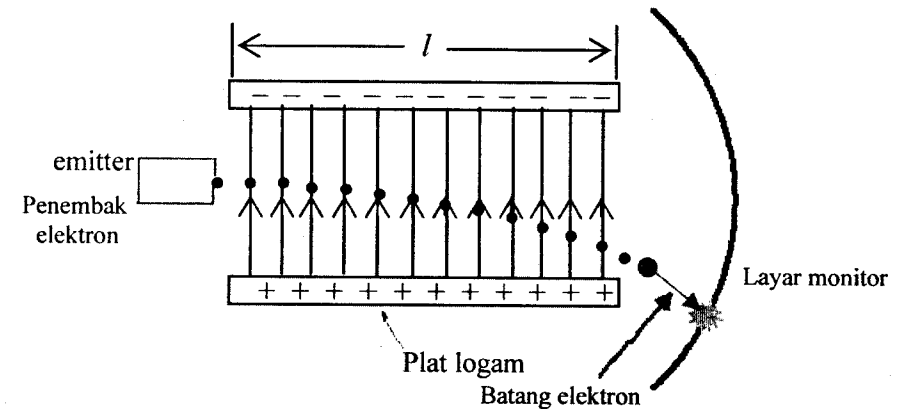


Gambar 1.1 Orbit elektron mengelilingi inti

Dengan demikian pada bab ini akan dipelajari mengenai hukum-hukum dasar serta definisi-definisi yang berkaitan dengan muatan, medan listrik, gaya listrik, energi potensial dan potensial listrik, dan diawali dengan pemahaman mengenai sistem satuan.

Muatan listrik akan menderita gaya akibat adanya pengaruh dari muatan lain. Gaya ini bergantung pada besar muatan, posisi dan kecepatan. Gaya akibat posisi muatan lain disebut gaya listrik dan akibat kecepatan geraknya disebut gaya magnet. Fenomena-fenomena ini sangat berperan dalam keteknikan elektro.

Sebagai contoh pada tabung pesawat televisi pada gambar 1.2, jejak elektron dapat dikontrol dengan mengatur percepatan dan pembelokan medan listrik oleh kerja elektrode yang memang dirancang untuk keperluan tersebut. Pada rangkaian memori komputer, balon magnet akan termagnetisasi oleh arus berbentuk pulsa dan menyimpan informasi digital dalam bentuk medan magnet.

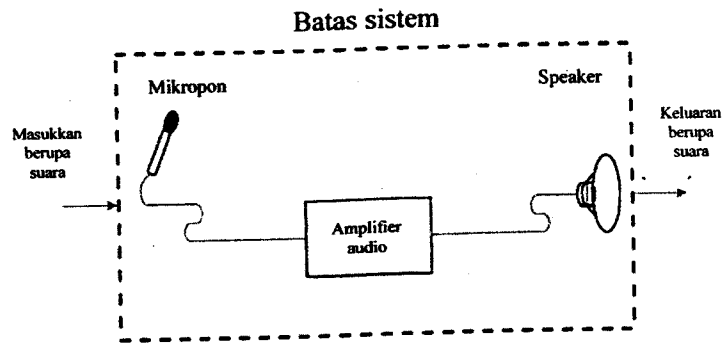


Gambar 1.2 Jejak elektron pada tabung pesawat televisi

Pada motor, kombinasi dari inti besi dan kumparan tembaga dibentuk untuk membangkitkan medan magnet yang memotong penghantar untuk membangkitkan torsi. Medan didistribusikan secara spesifik melalui sebuah daerah dan didefinisikan dalam dua atau tiga dimensi.

Piranti

Piranti listrik dirancang untuk beberapa fungsi, misal untuk pembangkitan, penguatan (amplifier), peubah (modulator), dan pendeteksi sinyal (detektor). Pada stasiun pemancar radio AM sebuah modulator mengubah amplitudo gelombang yang dipancarkan berkaitan dengan nada musik untuk menghasilkan amplitudo modulasi. Pada komputer, gerbang logika, pencacah dan penghitung di atur untuk menerima, memproses dan menyimpan sinyal digital. Sebuah mikropon adalah transduser yang mengubah energi akustik dalam bentuk gelombang suara sebagai masukan ke dalam energi listrik sebagai keluaran.



Gambar 1.3 Menunjukkan sebuah sistem lengkap yang terdiri atas beberapa piranti dengan beberapa fungsi

1.1 Sistem Satuan

Diperlukan satuan standar yang dapat dipahami oleh setiap orang dalam hal ini dipakai SI (Sistem Internasional) di mana ada 7 besaran dasar berdimensi seperti pada tabel 1-1.

Tabel 1.1 Beberapa macam besaran dasar

Besaran dasar	Satuan (SI)		
	Nama satuan	Lambang	Rumus dimensi
1. Panjang	meter	m	L
2. Massa	kilogram	kg	M
3. Waktu	sekon	s	T
4. Arus listrik	Ampere	A	I
5. Suhu termodinamika	kalori	K	θ
6. Jumlah zat	mola	mol	M
7. Intensitas cahaya	kandela	cd	J

Dianjurkan agar awalan pada satuan SI hanyalah yang menyatakan faktor 10^n saja, di mana n adalah bilangan bulat.

Tabel 1.2. Nama-nama Awalan

Pengali Desimal	Awalan	Lambang
10^{-12}	piko	p
10^{-9}	nano	n
10^{-6}	mikro	μ
10^{-3}	mili	m
10^{-2}	senti	c
10^{-1}	desi	d
1	-	-
10^{+1}	deka	da
10^{+2}	hecto	h
10^{+3}	kilo	k
10^{+6}	mega	M
10^{+9}	giga	G
10^{+12}	tera	T

contoh: $2 \text{ MW} = 2 \times 10^6 \text{ W}$

$6 \text{ }\mu\text{F} = 6 \times 10^{-6} \text{ F}$

$150 \text{ kV} = 150 \times 10^3 \text{ V}$

1.2 Definisi-definisi

Muatan adalah besaran dasar sebagaimana panjang, masa dan waktu. Unit muatan dalam MKS disebut Coulomb. Besar muatan dan masa untuk proton, elektron dan neutron adalah sebagai berikut,

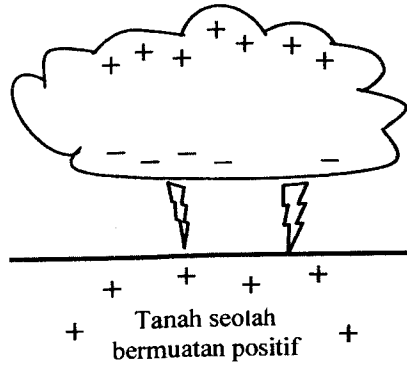
elektron: $q_e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ Coul}$; $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$

proton: $q_p = +1.6 \times 10^{-19} \text{ Coul}$; $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$

neutron: $q_n = 0$; $m_n = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$

Tubuh kita terdiri atas 5×10^{28} muatan positif dan 5×10^{28} muatan negatif, setimbang dalam jumlah muatan.

Fenomena alam adanya pelepasan muatan dapat dijumpai pada petir dapat dilihat pada gambar 1.4 Muatan-muatan negatif yang ada di awan akan mendekati muatan positif yang ada di bumi, karena pada dasarnya permukaan bumi bermuatan negatif, maka muatan negatif di awan ingin mengembalikan kondisi tersebut.

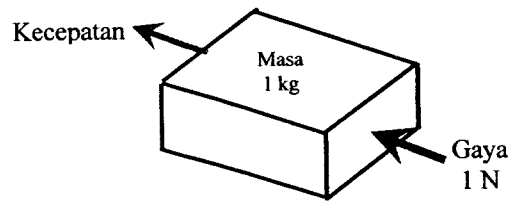


Gambar 1.4 Pelepasan muatan pada petir

a. Gaya (F)

Gaya sebesar 1 Newton didefinisikan sebagai gaya yang memberikan percepatan sebesar 1 meter per sekon kuadrat pada massa sebesar 1 kilogram.

$$1 \text{ Newton} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (1.1)$$



Gambar 1.5 Gaya yang bekerja pada sebuah massa dengan adanya percepatan

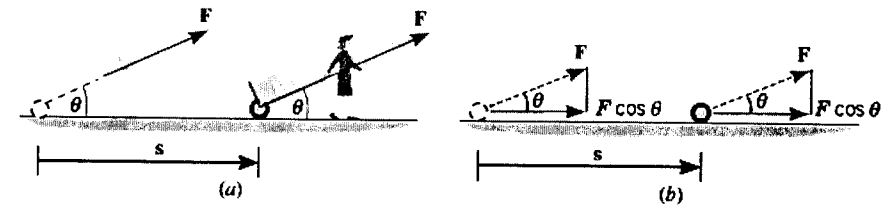
Nilai Gravitasi bumi sebesar $9,8 \text{ m/det}^2$

$$F = m \cdot a \quad (1.2)$$

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{det}^2}$$

b. Energi (W)

Sebuah objek yang menderita gaya sebesar 1 Newton bergerak sepanjang 1 meter akan membutuhkan energi sebesar 1 Joule. Atau sebuah objek yang membutuhkan gaya sebesar 1 Newton untuk melawan gaya gravitasi menerima potensial energi sebesar 1 Joule bila dinaikkan setinggi 1 meter.



Gambar 1.6 Energi pada sebuah obyek

$$W = F \cos \theta \cdot s \quad (1.3)$$

W = energi dalam Joule

1 Joule = 1 Newton.meter = 1 Watt detik

F = besaran gaya dalam Newton

s = jarak perpindahan

θ = sudut diantara gaya dan arah perpindahan (lihat gambar 1.5)

Contoh soal 1.1

- 1) Sebuah kontainer dengan berat masa 55 kg diangkat setinggi 3 meter dalam waktu 3 detik. Berapa gaya dan energi dalam watt-jam yang dibutuhkan untuk mengangkat kontainer tersebut.

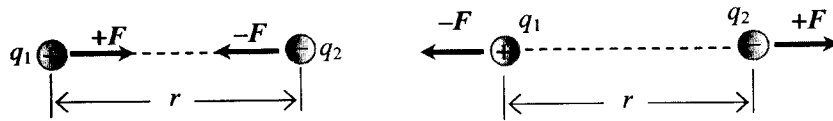
Jawab: a) Akibat gaya gravitasi maka terjadi gaya $F_{\text{grav}} = m \cdot g$

$$F_{\text{grav}} = 55 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/det}^2 = 539 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } W &= F \cdot s = 539 \text{ N} \times 3 \text{ det} = 1617 \text{ Joule} = \frac{1617}{36.10^5} \\ &= 0,44 \text{ Watt jam} \end{aligned}$$

c. Kuat Medan Listrik (E)

Terjadi interaksi diantara dua muatan, muatan yang sama tanda akan tolak menolak dan muatan yang berbeda tanda akan saling tarik menarik seperti pada gambar 1.7. Interaksi ini menghasilkan gaya yang disebut gaya Coulomb.



Gambar 1.7 Gaya Coulomb yang terjadi akibat satu muatan terhadap muatan yang lain

(a) Gaya tarik menarik oleh adanya muatan yang berbeda

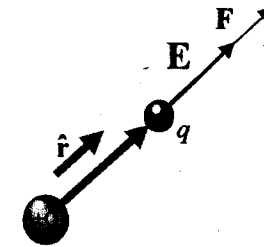
(b) Gaya tolak menolak oleh adanya muatan yang sama

Besar gaya Coulomb dihitung dengan $F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$ (1.4)

Dengan nilai $k = 9 \times 10^9 \text{ Nt-m}^2/\text{Coul}^2$ di udara bebas bandingkan dengan gravitasi bumi G yang hanya sebesar $6.67 \times 10^{-11} \text{ Nt-m}^2 / \text{kg}^2$. Gaya ini merupakan besaran vektor karena mempunyai besar dan arah.

Setiap muatan baik positif maupun negatif akan menyebabkan adanya medan listrik di suatu ruang. Dan medan ini akan mengakibatkan adanya aksi pada muatan yang lain sehingga muatan akan berpindah.

Kuat medan listrik (E - N/C) didefinisikan sebagai gaya yang bekerja pada sebuah muatan penyidik dibagi dengan muatan penyidik itu sendiri. Dengan kata lain, kuat medan listrik adalah sebuah besaran vektor yang menyatakan arah dan besar gaya pada suatu unit muatan. Arah medan listrik ditunjukkan seperti pada gambar 1.8.



Gambar 1.8 Arah kuat medan listrik

Nilai kuat medan listrik adalah: $E = \frac{F}{q}$ (1.5)

$$E = 9 \times 10^9 \frac{Q}{r^2} \quad (1.6)$$

Contoh soal 1.2

1. Jarak antara elektron dan proton sebuah atom Hidrogen sebesar $5,3 \times 10^{-11}$ meter. Berapa gaya listrik yang diterima muatan dibandingkan dengan gaya gravitasinya.

Jawab:

- a) Gaya listrik yang diterima,

$$\begin{aligned} F_e &= k \frac{|q_1||q_2|}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{1,6 \times 10^{-19} \times 10^{-19}}{(5,3 \times 10^{-11})^2} \\ &= 8,1 \times 10^{-10} \text{ N} \end{aligned}$$

- b) Gaya gravitasinya,

$$\begin{aligned} F_g &= G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6,7 \times 10^{-11} \frac{9,1 \times 10^{-31} \times 1,7 \times 10^{-27}}{(5,3 \times 10^{-11})^2} \\ &= 3,7 \times 10^{-47} \text{ N} \end{aligned}$$

Gaya elektrik lebih besar dari gaya gravitasi 10^{29} kali.

2. Sebuah muatan $+6 \mu\text{C}$ menderita gaya sebesar 2 mN pada sumbu x positif. Berapa besar kuat medan listrik sebelum muatan ditempatkan di situ dan ke mana arahnya.

Jawab: gaya F yang diterima muatan sebesar

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{Q \times 6 \cdot 10^{-6}}{r^2}$$

$$2 \cdot 10^{-3} = 9 \times 10^9 \frac{Q \times 6 \cdot 10^{-6}}{r^2}$$

$$Q = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{9 \times 10^9} \frac{r^2}{6 \cdot 10^{-6}}$$

$$E = 9 \times 10^9 \frac{2 \cdot 10^{-3}}{9 \times 10^9 r^2} \frac{r^2}{6 \cdot 10^{-6}} = 333 \text{ N/C}$$

Atau dengan cara lain,

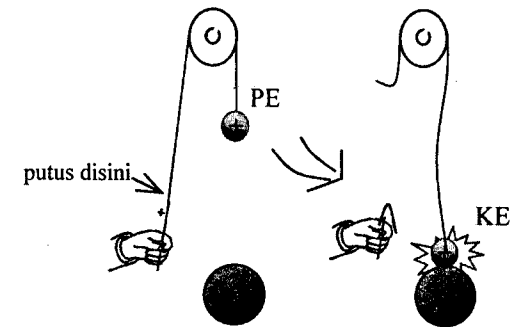
$$E = \frac{F}{q} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-6}} = 333 \text{ N/C}$$

d. Potensial Listrik dan Tegangan (V)

Energi yang tersimpan disebut energi potensial, contoh adalah: pegas, panah, lembaran karet, baterai dan bisa juga gravitasi.

Konsep potensial listrik berdasar

- adanya gaya tarik menarik atau tolak menolak muatan-muatan sehingga terjadi medan listrik
- kuat medan listrik
- besar energi yang terjadi akibat muatan yang bergerak dalam medan listrik



Gambar 1.9 Tenaga potensial listrik (PE)

Tenaga Potensial Listrik (PE-Joule) adalah energi sebesar 1 Joule untuk membawa muatan penyidik q Coulomb dari suatu tempat sampai ke suatu titik sejauh r dalam medan listrik oleh adanya muatan Q . Atau dapat juga didefinisikan tenaga potensial listrik terjadi oleh pemisahan muatan positif dari muatan negatif (lihat gambar 1.9)

$$PE = k \frac{Qq}{r} \quad (1.7)$$

Potensial Listrik adalah Tenaga Potensial Listrik per satuan muatan itu sendiri

$$V_A = k \frac{Q}{r} \quad (1.8)$$

Satuan untuk Potensial Listrik adalah: joule/coulomb = volt (V)

Bila terjadi beda potensial diantara dua titik misal titik A dan B maka beda potensial ini juga disebut tegangan. Tegangan sebesar 1 Volt dapat juga dinyatakan sebagai kerja sebesar 1 Joule untuk membawa muatan sebesar 1 Coulomb dari titik B ke titik A

$$V_{AB} = \frac{dW_{BA}}{dq} \quad (1.9)$$

$$1 \text{ volt} = 1 \text{ joule/coulomb}$$

Hubungan antara kuat medan dan tegangan dapat dianalisis sebagai berikut,

$$E = \frac{F}{q} \text{ maka } \frac{\text{Gaya}}{\text{muatan}} = \frac{\text{Gaya} \times \text{jarak}}{\text{muatan} \times \text{jarak}} = \frac{\text{Kerja}}{\text{muatan} \times \text{jarak}}$$

$$= \frac{\text{Kerja}}{\text{muatan}} = \frac{1}{\text{jarak}}$$

$$= \frac{\text{Tegangan}}{\text{Jarak}}$$

$$E = \left| -\frac{dV}{ds} \right| \text{ Volt/meter} \quad (1.10)$$

Contoh soal 1.3

- 1) Dibutuhkan energi sebesar 8 mJ untuk memindahkan muatan sebesar 200 μC dari satu titik ke titik yang lain pada sebuah rangkaian listrik. Hitung beda potensial di antara kedua titik dan berapa banyaknya elektron yang ada.

Jawab: a) dari persamaan 1.10 beda potensial atau tegangan sebesar,

$$V_{AB} = \frac{dW_{BA}}{dq} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{200 \cdot 10^{-6}} = 40 \text{ volt}$$

b) banyaknya elektron pada saat itu

$$n = \frac{200 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 125 \cdot 10^{13} \text{ volt}$$

- 2) Sebuah penembak elektron menyebabkan elektron dipercepat gerakannya untuk menembaki layar monitor dengan melalui dua plat dengan beda potensial 20 kV pada jarak 4 cm. Berapa kuat medan listrik rata-rata di antara plat?

Jawab: $\epsilon = \frac{dV}{ds}$

$$\epsilon = \frac{2000}{4 \cdot 10^{-2}} = 5 \times 10^5 \text{ V/m}$$

- 3) Tegangan 2000 Volt dipasang antara 2 plat paralel sejauh 1 cm. Massa elektron $-9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ dipasang antara ke dua plat. Hitung kuat medan di antara plat, gaya pada elektron dan percepatan gerakannya.

Jawab:

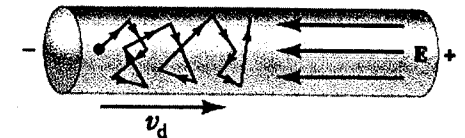
a) dari persamaan 1.11 maka $E = \frac{2000}{1 \cdot 10^{-2}} \text{ volt/meter} = 200 \text{ kV/m}$

b) $F = m \cdot a$ atau $F = qE = 200 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 3,2 \cdot 10^{-14} \text{ Newton}$

c) $a = \frac{3,2 \cdot 10^{-14}}{9,1 \cdot 10^{-31}} \text{ m/det} = 0,35 \cdot 10^{16} \text{ kV/m}$

e. Arus Listrik (I)

Terdapat sejumlah elektron bebas dalam material pada gambar 1.10. Bila ada beda potensial di antara ujung-ujung material akan ada muatan bebas mengalir dari potensial tinggi ke potensial rendah, seperti laju aliran air dalam pipa. Sejumlah muatan yang mengalir per satuan waktu didefinisikan sebagai arus yang dinyatakan dalam i apabila dalam fungsi waktu atau I apabila nilainya konstan



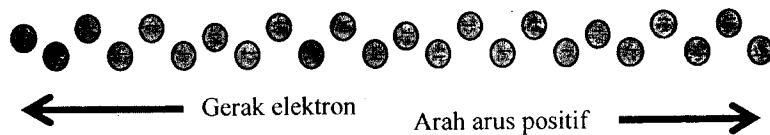
→ Arah gerak elektron bebas sebelum ada kuat medan listrik

→ Arah arus

Gambar 1.10 Arah gerak muatan dalam sebuah pengantar

Arus didefinisikan sebagai aliran muatan positif yang berlawanan dengan gerak elektron sebagai terlihat pada gambar 1.11. Pada kenyataannya elektron mengalir secara perlahan, kurang dari 0.01 meter per detik, walaupun demikian medan listrik bergerak seperti

kecepatan cahaya! Sehingga sinyal atau informasi dapat dikirim ke terminal dengan potensial lebih rendah secepat kecepatan cahaya.



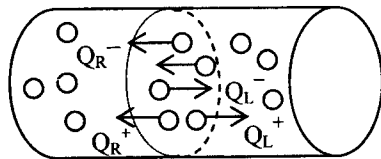
Gambar 1.11 Arah gerak elektron dan arah arus

Bila ada sejumlah muatan yang mengalir seperti pada gambar 1.12 maka muatan total

$$\begin{aligned} Q_{\text{total}} &= (Q_R^+ - Q_R^-) + (Q_L^+ - Q_L^-) \\ &= (Q_R^+ + Q_L^+) - (Q_R^- + Q_L^-) \end{aligned}$$

Q_R = muatan yang mengalir ke kanan

Q_L = muatan yang mengalir ke kiri



Gambar 1.12 Muatan mengalir dalam penghantar

Laju perpindahan muatan pada suatu luasan menyebabkan terjadinya arus. Dengan demikian arus adalah banyaknya muatan yang mengalir pada suatu luasan penampang penghantar per satuan waktu.

Per definisi,

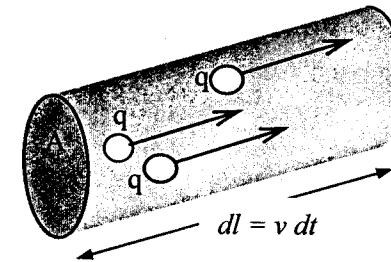
Arus sebesar 1 ampere adalah muatan sebesar 1 coulomb yang mengalir pada suatu luasan penampang dalam satu waktu 1 detik.

$$- 1 \text{ amp} = 1 \text{ coulomb/sec} = 6.02 \times 10^{23} \text{ electrons/detik}$$

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.11)$$

$$1 \text{ Ampere} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ detik}}$$

Bila ada sejumlah muatan yang mengalir lewat suatu luasan $A \text{ m}^2$ seperti pada gambar 1.13,



Gambar 1.13 Aliran muatan pada penghantar

Kecepatan muatan = v

$$v = \frac{dl}{dt} \text{ atau } dl = v dt$$

besar volume = $A \cdot dl = A v dt$

Jumlah muatan per unit volume = n ,

Setiap muatan = q Coulomb

Maka jumlah muatan total yang mengalir: $dq = n \cdot q \cdot A \cdot v \cdot dt$ (1.13)

Sehingga nilai arus yang mengalir, $i = \frac{dq}{dt} = nqvA$ (1.12)

$$J = \frac{i}{A} = nqv \quad (1.13)$$

Kerapatan arus

Beberapa hal yang perlu diketahui antara lain:

- Muatan terkecil adalah elektron dengan nilai $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$. Sehingga 1 Coulomb adalah muatan sebanyak $6,24 \times 10^{18}$ elektron.
- Ada sejumlah 6.25×10^{18} elektron yang mengalir lewat sebuah titik pada sebuah penghantar per sekon. Pergerakan elektron sangat lambat, kurang dari 0.01 meter/detik. Meskipun demikian kuat medan listrik bergerak dengan kecepatan cahaya.

- Arus mengalir dari terminal positif menuju ke terminal negatif.
- Mengapa burung dengan aman hinggap pada kawat transmisi 5000 V?

Dalam tubuh kita terdapat 5×10^{28} muatan positif setimbang dengan 5×10^{28} muatan negatif. Tubuh kita akan berlaku sebagai penghantar listrik. Kulit tubuh manusia mempunyai nilai resistansi antara 100 ohms saat kondisi basah hingga 500.000 ohms saat kering.

Derajat kerusakan tubuh bergantung pada

- Besarnya nilai arus
- Lama waktu arus lewat
- Bagian tubuh yang dilewati arus pertama kali

Efek arus listrik pada badan manusia

- 1 mA dapat menyebabkan jatuh
- 5 mA terasa sakit dan sedikit rasa kejut
- 10 mA menyebabkan gerak otot terganggu
- 15 mA menyebabkan kehilangan kontrol pada otot
- 70 mA menyebabkan gangguan pada ritme kerja jantung dan terjadi hal yang fatal apabila arus mengalir lebih dari 1 detik

Contoh soal 1.4

- 1) Berapa banyaknya elektron yang melalui tubuh kita saat terasa sakit dalam waktu 1 menit?

Jawab: $\Delta t = 1$ sekon

$$i = 0.005 \text{ A}$$

$$\Delta q = ?$$

$$\Delta q = i \Delta t = 0.005 \text{ C}$$

$$\text{Banyaknya elektron} = \Delta q / e = 3.12 \times 10^{16} \text{ elektrons}$$

Ada sejumlah 31,2 triliun elektrons

- 2) Berapa waktu yang dibutuhkan sehingga terjadi arus 2 Amp. bila muatan yang lewat pada penghantar sebanyak 120 C?

$$\text{Jawab: } i = \frac{dq}{dt} \rightarrow$$

$$t = \frac{Q}{i} = \frac{120}{2} = 60 \text{ detik}$$

- 3) Sebuah tabung layar televisi dengan suplai tegangan 25 kV. Hitung: a) energi yang dihasilkan oleh gerakan elektron dengan potensial tersebut; b) arus yang lewat bila dayanya 2 W.

$$\text{Jawab: a) } W = Vdq = 25 \times 10^3 \times 1.6 \times 10^{-19} = 4 \times 10^{-15} \text{ J}$$

$$\text{b) } i = \frac{P}{V} = \frac{2}{25 \times 10^3} = 0,08 \times 10^{-3} = 0,08 \text{ mAmp}$$

- 4) Penghantar tembaga dengan luas penampang 1 mm² dialiri arus konstan 20 Amp. Kerapatan muatan $8,5 \times 10^{28}$ elektron/m². Berapa kerapatan arus dan berapa kecepatan gerak muatan.

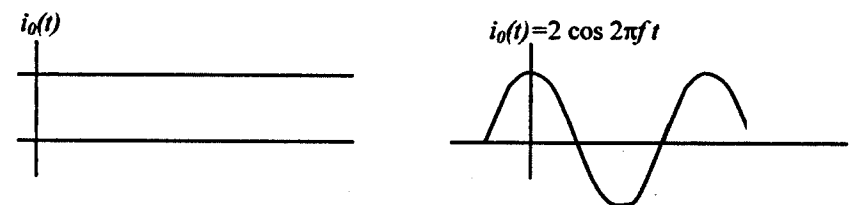
$$\text{Jawab: a) } \mathcal{J} = \frac{i}{A} = \frac{20}{1 \times 10^{-6}} = 20 \times 10^6$$

$$\text{b) } v = \frac{i}{nqA} = \frac{20 \text{ C/det}}{8,5 \times 10^{28} \times 1,6 \times 10^{-19} \times 3 \times 10^{-6}} = 1,6 \times 10^3 \text{ m/det}$$

Tipe-tipe Arus

- 1) Arus Searah (Direct Current = DC)

- Arus mengalir searah dengan besaran konstan (dibangkitkan oleh baterai atau accu)



Gambar 1.14 Dua tipe arus

2) Arus Bolak balik (Alternating Current = AC)

- Besar dan arah arus mengalir berubah secara periodis.
- Setiap sekuen disebut siklus
- Frekuensi adalah banyaknya siklus per detik (Hz)

f. Daya (P) Dan Energi Listrik(W)

Laju sebuah energi yang berubah dari satu bentuk ke bentuk yang lain adalah daya. Daya dihasilkan oleh adanya tegangan diantara sebuah elemen yang dilalui oleh arus. Besar daya dinyatakan dalam Watt. Hubungan antara energi dan daya adalah:

$$W = \int p \, dt \quad (1.14)$$

$$\text{Daya rata-rata: } P = \frac{dW}{dt}$$

$$\text{Daya rata-rata: } p = \frac{dW}{dt}$$

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \frac{dq}{dt} = vi \quad (1.15)$$

$$1\text{Watt} = \frac{1\text{Joule}}{1\text{detik}}$$

$$1\text{kWH} = 36 \times 10^5$$

Resistor mengubah energi listrik menjadi energi panas dengan nilai kalor Joule:

$$H = c.m. \Delta T - \text{kcal} \quad (1.16)$$

c = konstanta kalor tergantung material, untuk air c = 1

m = massa benda, untuk 1 liter air = 1 kg air

ΔT = selisih temperatur akhir terhadap temperatur awal

1kcal = 4186 Joule

$$1\text{kWH} = \frac{36 \times 10^5}{4186} = 860 \text{ kcal}$$

Contoh soal 1.5

- 1) Berapa panas yang dihasilkan oleh sebuah seterika listrik bila disuplai oleh tegangan 120 Volt dan arus yang mengalir sebesar 8 Amp. bila digunakan selama 30 menit.

$$\text{Jawab: } P = V.I = 120 \text{ Volt} \cdot 8 \text{ Amp.} = 960 \text{ Watt}$$

$$W = P.t = 960 \times 30 \times 60 = 1,73 \times 10^6 \text{ Joule}$$

$$H = \frac{1,73 \times 10^6}{4186} = 412,8 \text{ kcal}$$

- 2) Sebuah pesawat televisi berwarna dengan daya 650 W dihidupkan dari jam 7 malam hingga jam 11.30 malam. Berapa: a) energi yang dihabiskan dalam MJ dan dalam kWh.; b) biaya yang harus dibayarkan bila tarif listrik Rp. 900,- per kWh.

$$\text{Jawab: Daya TV} = 650 \text{ W} = 650 \times 10^{-3} \text{ kW}$$

$$\text{a) Energi yang dihabiskan} = 650 \times 10^{-3} \times 4,5 \text{ jam} = 2,93 \text{ kWh} \\ = 2,93 \times 36 \times 10^6 = 10,5 \text{ MJ}$$

$$\text{b) Biaya yang harus dibayarkan} = 2,93 \times \text{Rp } 900,- = \text{Rp. } 2637,-$$

- 3) Sebuah pulsa listrik menyatakan nilai 305 Volt dan 0,15 Amp setelah jangka waktu 500 μ det. Berapa daya rata-rata dan energi yang disajikan dalam Joule?

Jawab:

$$\text{a) } P = V I = 305 \cdot 0,15 = 45,75 \text{ Watt}$$

$$\text{b) } W = 45,75 \cdot 500 \cdot 10^{-6} = 22875 \cdot 10^{-6} \text{ Watt.detik} = 22,9 \text{ mJ.}$$

- 4) Untuk memanaskan air sebanyak 2 liter dari 30° hingga mendidih dibutuhkan waktu 5 menit. Suplai tegangan untuk pemanas 100 Volt. Berapa daya yang dibutuhkan, besar arus yang mengalir dalam elemen dan nilai resistansi elemen.

Jawab: a) $H = c.m. \Delta T - \text{kcal} = 1.2. (100^\circ - 30^\circ) = 140 \text{ kcal}$

$$W = \frac{140}{860} = 0,163 \text{ kWh} = 163 \text{ Wattjam}$$

$$W = Pt$$

$$P = \frac{163.60}{5} = 1956 \text{ Watt} = 1,96 \text{ kW}$$

$$\text{b) } I = \frac{1956}{100} = 19,56 \text{ Amp}$$

$$\text{c) } R = \frac{1956}{(19,6)^2} = 5,1 \Omega$$

- 5) Lampu mobil bekerja pada daya 30 W dengan suplai tegangan 12 Volt. Hitung: a) Besar muatan setiap menit; b) Banyaknya elektron yang mengalir pada saat itu; c) Besar biaya yang harus dibayarkan untuk 48 jam bila tarif per kWh Rp. 700,- ; d) Resistansi lampu!

$$\text{Jawab: } i = \frac{P}{V} = \frac{30}{12} = 2,5 \text{ Amp}$$

$$\text{a) } q = i t = 2,5 \text{ Amp. } 60 \text{ detik} = 150 \text{ Coulomb}$$

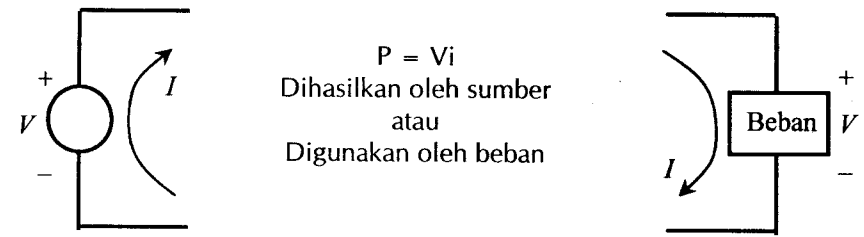
$$\text{b) } n = \frac{150}{1,6 \times 10^{-19}} = 9,375 \times 10^{20}$$

$$\text{c) } W = 30 \text{ W} \times 48 \text{ jam} = 1,44 \text{ kWh}$$

$$\text{Besar biaya} = 1,42 \times \text{Rp. } 700,- = \text{Rp. } 1008,-$$

$$\text{d) } P = \frac{V^2}{R} \rightarrow R = \frac{V^2}{P} = \frac{12^2}{30} = 4,8 \Omega$$

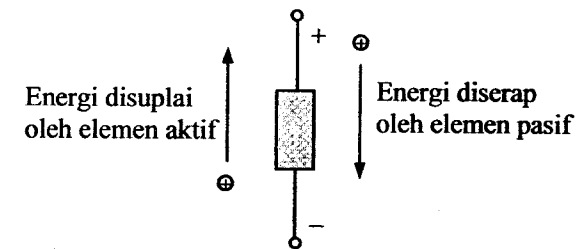
Watak daya dipengaruhi oleh elemen yang ada. Daya akan bersifat positif bila diterapkan pada elemen pasif dan akan bersifat negatif pada elemen aktif seperti pada gambar 1.15



Gambar 1.15 Daya oleh sumber dan daya oleh beban

- Bila $p > 0$, artinya menyerap daya;
- Bila $p < 0$, kenyataannya membangkitkan daya.

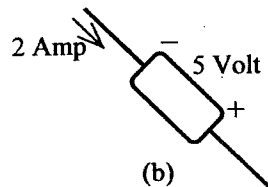
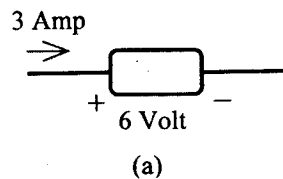
Bila arus mengalir dari terminal negatif menuju terminal positif, maka dikatakan elemen aktif memberikan atau mensuplai daya. Dan bila arus mengalir dari terminal positif menuju terminal negatif, maka dikatakan daya diserap oleh elemen pasif. Untuk memenuhi konversi energi, maka pada elemen aktif daya bernilai negatif dan pada elemen pasif daya bernilai positif. Seperti terlihat pada gambar 1.16



Gambar 1.16 Watak dari energi yang diserap dan energi yang disuplai

Contoh soal 1.6

- 1) Berapa daya pada elemen-elemen dari gambar 1.17 (a) dan (b) oleh adanya arus dan tegangan yang diterapkan dan sebutkan jenis elemennya.



Gambar 1.17 Daya pada elemen untuk soal 1

Jawab: (a) $P = + 6 \text{ Volt} \cdot 3 \text{ Amp} = 18 \text{ Watt}$, jenis elemen pasif
 (b) $P = - 5 \text{ Volt} \cdot 2 \text{ Amp} = -10 \text{ Watt}$ adalah elemen aktif

g. Efisiensi

Pada setiap proses selalu akan terjadi daya yang hilang sebagai panas sehingga daya yang masuk tidak 100% dimanfaatkan, terjadi nilai efisiensi:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \quad (1.17)$$

$$\text{dengan } P_o = P_i - P_{\text{loss}}$$

$$\eta = \frac{P_i - P_{\text{loss}}}{P_i}$$

Besaran daya yang lain adalah daya kuda atau Horse Power dengan $1 \text{ HP} = 746 \text{ Watt}$.

Contoh soal

- 1) Motor 5 HP disuplai oleh tegangan 220 Volt dan arus yang masuk 18 Amp. Berapa nilai efisiensi motor dan berapa daya yang hilang?

$$\text{Jawab: } P_o = 5 \text{ HP} = 3730 \text{ Watt}$$

$$P_i = V \cdot I = 220 \cdot 18 = 3960 \text{ Watt}$$

$$\text{a) } \eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{3730}{3960} \times 100\% = 94,1\%$$

$$\text{b) } P_{\text{loss}} = 3960 - 3730 = 230 \text{ Watt}$$

- 2) Untuk mengangkat beban seberat 5 ton dibutuhkan energi sebesar 15,5 MJ. Berapa tinggi beban itu diangkat bila efisiensi pesawat pengangkat hanya 70%

$$\text{Jawab: } W = mgh \Rightarrow 15 \times 10^6 \times 0,7 = 5000 \times 9,8 \times h$$

$$h = \frac{15,5 \times 10^6 \times 0,7}{5000 \times 9,8} = 221,49 \text{ meter}$$

- 3) Berapa tenaga listrik yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur air sebanyak 45 liter dari 0° hingga 75°C bila efisiensi pemanas 90%

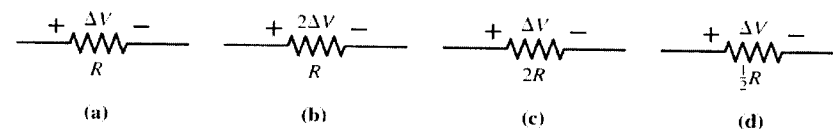
$$\text{Jawab: } H_o = c \cdot m \cdot \Delta T \text{ kcal} = 1.45 \cdot (75 - 0)^\circ\text{C} = 3375 \text{ kcal}$$

$$\text{Jadi panas yang dibutuhkan } H_{in} = \frac{3375}{0,9} = 3750 \text{ kcal}$$

$$\text{Tenaga yang dibutuhkan } W_{in} = \frac{3750}{860} = 4,38 \text{ kWh}$$

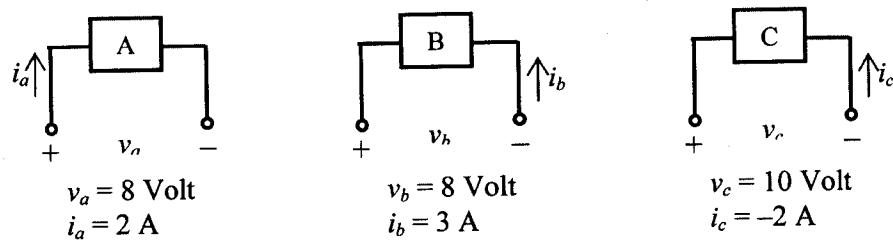
Latihan Soal

- 1) Tuliskan kembali nilai-nilai di bawah ini dengan berdasarkan tabel besaran di atas
- 10,000 V
 - 0.00001 A
 - 0.004 seconds
 - 630,000,000 Watts
 - 0.00006 A
- 2). Diantara Resistor pada gambar 1.18 ini, resistor mana yang menyerap daya paling besar,



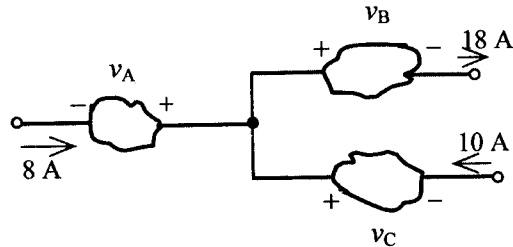
Gambar 1.18 Resistor-resistor untuk latihan soal no. 2

- 3). Hitung nilai daya yang lewat elemen-elemen pada gambar 1.19 di bawah ini dan sebutkan jenis elemennya



Gambar 1.19 Elemen-elemen untuk latihan soal no. 3

- 4). Bila $P_1 = -160$ W, $P_2 = -250$ W dan $P_3 = 450$ W, berapa nilai tegangan pada elemen-elemen A, B dan C pada gambar 1.20



Gambar 1.20 Elemen-elemen untuk latihan soal no. 4

1.3 Daftar Pustaka

- Boylestad, Robert, *Introductory Circuit Analysis*, Prentice Hall, Inc. 1997
- Edminister, Joseph A., *Theory and Problem Of Electric Circuit in S.I. Unit*, New York: McGraw Hill, 1972.
- Floyd, Thomas, F., *Principles of Electric Circuit*, Prentice Hall, 2000.
- Hayt Jr., William H.; Kemmerly, Jack E., *Engineering Circuit Analysis*, McGraw-Hill, Inc., 1993.

Johnson, David E., *Basic Electric Circuit Analysis*, Prentice Hall, Inc. 1995

Mismail, Budiono, *Dasar Teknik Elektro*, Bayu Media Publishing 2006.

Paul, C.R., *Introduction To Electrical Engineering*, McGraw-Hill, Inc., 1992.

Rizzoni, Giorgio., *Principles and applications of Electrical Engineering*, Third edition, McGraw-Hill, 2000

Ryder, John D., *Electrical and Electronic Engineering*, McGraw-Hill Book Company, 1967

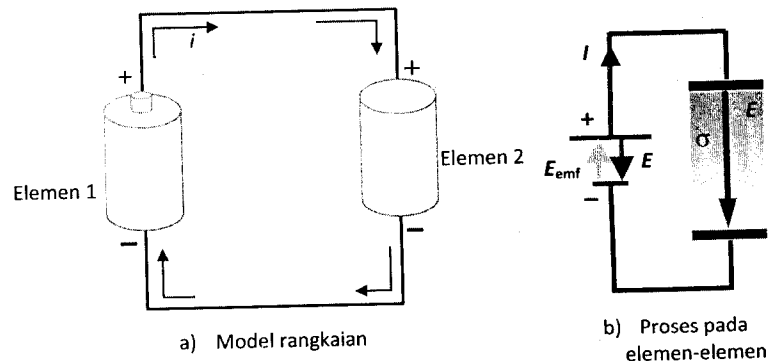
Smith, R. J. *Circuits, Devices and Systems*. New York: John Wiley and Sons Inc., 1972.

Soegiyardjo, S., *Dasar Teknik Elektro*, ITB, 2004

-oo0oo-

Elemen-elemen Rangkaian

Pada bab ini akan dijelaskan tentang elemen atau komponen yang ada pada rangkaian listrik. Rangkaian listrik merupakan himpunan beberapa elemen baik elemen aktif maupun elemen pasif sehingga arus dapat mengalir secara kontinu. Dengan mengetahui watak elemen akan dapat mengevaluasi transformasi energi dari resistor, induktor dan kapasitor serta memahami tentang penyimpanan energi.



Gambar 2.1 Rangkaian listrik sederhana terdiri atas dua elemen

Bila terminal positif pada elemen I seperti pada gambar 2.1 dihubungkan dengan terminal negatif melalui elemen II maka terjadi pergerakan muatan atau arus melalui sebuah edaran tertutup sehingga membangkitkan kuat medan listrik E . Elemen I ini sebagai elemen aktif atau elemen yang mensuplai daya, dan elemen II adalah elemen pasif atau yang menerima daya.

Pada bab ini juga akan dibahas makna dari rangkaian terbuka dan rangkaian tertutup yang nantinya akan ada hubungannya dengan watak elemen pasif bila disuplai dengan tegangan/arus searah atau kontinu maupun oleh tegangan/arus bolak balik pada elemen tersebut.

2.1 Elemen Aktif

Elemen aktif adalah elemen yang dapat membangkitkan tenaga atau mensuplai daya, contoh: sumber tegangan maupun sumber arus.

a. Gaya Gerak Listrik

Pada elemen aktif arus akan mengalir dari potensial rendah ke potensial yang tinggi sehingga diperlukan gaya untuk mendorong muatan dari terminal negatif menuju terminal positif yang mengimbangi kuat medan listrik E sebesar E_{emf} disebut Gaya Gerak Listrik (GGL) atau dikenal dengan *Electro Motive Force (EMF)* atau dengan kata

lain perlu memberi tenaga potensial pada muatan-muatan sehingga terjadi beda potensial (*potential difference*) atau tegangan (*voltage*) diantara terminal positif dan negatif. Satuan untuk GGL sama dengan E atau V .

Untuk meningkatkan nilai potensial sepanjang arah arus harus ada sebuah sumber yang mampu:

- Mengubah satu bentuk energi ke dalam energi listrik.
- Membawa muatan dari potensial rendah ke potensial tinggi.
- Menjaga nilai potensial diantara terminal-terminal.

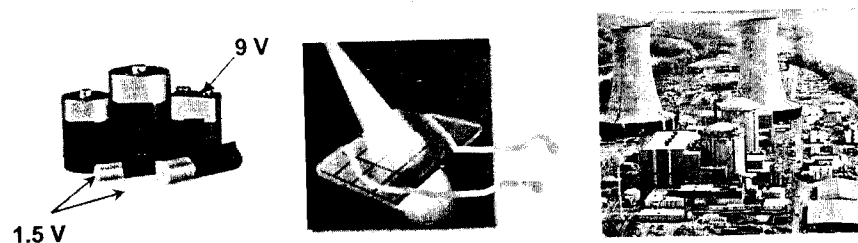
Konservasi energi pada komponen aktif rangkaian harus memperoleh dayanya dari tempat lain dan selanjutnya akan dibangkitkan EMF:

- Dari sumber non listrik, contohnya:
 - Baterai (kimia)
 - Dinamo (mekanis)
 - Transduser secara umum (cahaya, suara dan sebagainya)
- Dari sumber listrik lain
 - Catu daya (*Power supplies*)
 - Trafo daya
 - Amplifier

Sumber-sumber yang membangkitkan EMF seperti terlihat pada gambar 2.2. Beberapa contoh proses untuk membangkitkan EMF sebagai berikut,

- Baterai : proses reaksi kimia elektrolitik
- Generator : proses induksi medan magnet, energi mekanik
- Fuel cell : proses oksidasi bahan bakar
- Sel surya (*Solar cell*) : proses gelombang elektromagnet
- Thermopile : proses reaksi nuklir

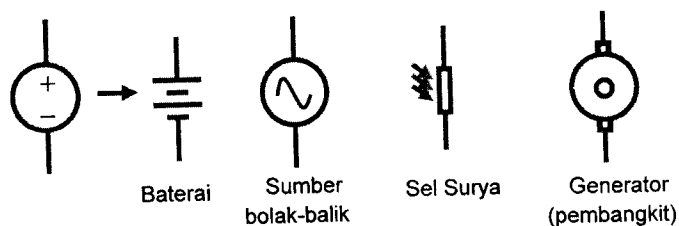
- Thermokopel : proses reaksi panas
- photo-voltaic cells : proses reaksi cahaya



Gambar 2.2 Berbagai jenis pembangkit tenaga listrik

Sumber tegangan yang lazim dimanfaatkan adalah generator dan baterai, yang digambarkan sebagai pompa yang mendorong air dengan sebuah tekanan.

Simbol elemen aktif berdasarkan jenis EMF nya digambarkan pada 2.3



Gambar 2.3 Simbol untuk elemen aktif berdasar pembangkitan EMF-nya

Tegangan didefinisikan sebagai kerja untuk membawa muatan sebesar 1 Joule untuk memindahkan muatan sebesar 1 Coulomb dari potensial rendah ke potensial tinggi. Lihat persamaan 1.10.

Persamaan tegangan

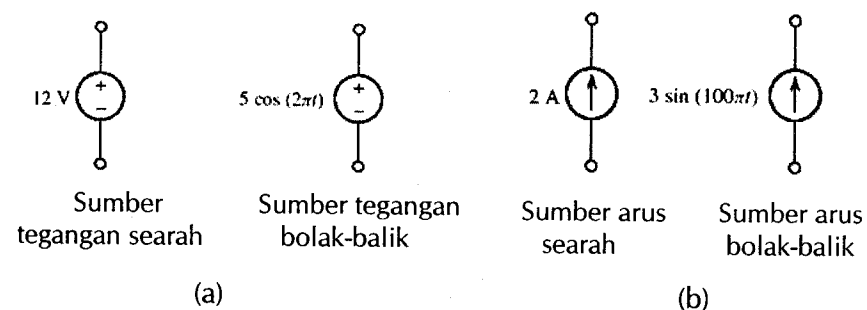
$$V = W/Q \quad (2.1)$$

V = tegangan dalam volt (V)

Q = jumlah muatan dalam Coulomb (C)

W = energi dalam Joule (J)

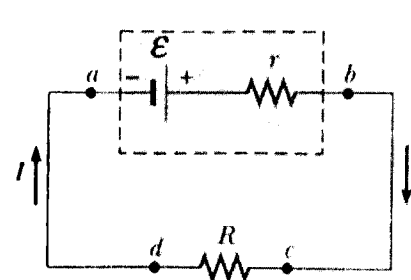
Simbol elemen aktif beserta nilainya untuk sumber tegangan seperti pada gambar 2.4a) sedang untuk simbol beserta besarnya untuk sumber arus pada gambar 2.4b).



Gambar 2.4 Simbol elemen aktif

b. Tahanan Dalam Baterai

Baterai pertama kali diciptakan oleh Allesandro Volta (1800). Sebuah baterai mempunyai resistansi internal yang kecil dengan dua elektrode, satu elektrode membangkitkan muatan +, dan satu lagi muatan - dan diantara elektrode berisi larutan elektrolit (*dilute acid*). Biasanya digunakan seng, perak dan sebagai elektrolit adalah larutan air garam untuk membangkitkan tegangan. Baterai yang ideal tidak mempunyai tahanan dalam (*Internal Resitance*)



Gambar 2.5 Rangkaian dengan baterai sebagai suplai daya

Karena baterai mempunyai nilai tahanan dalam yang kecil (r). Sehingga tegangan pada terminal baterai (V_{ab}) atau tegangan efektif baterai akan lebih kecil dari nilai EMF (\mathcal{E}).

$$V_{ab} = \mathcal{E} - iR \quad (2.2)$$

$$\text{Nilai arus yang mengalir } i = \frac{\varepsilon}{R+r} \quad (2.3)$$

$$\text{Tegangan } V_{ab} \text{ dapat dihitung sebagai: } V_{ab} = \varepsilon - \frac{\varepsilon}{R+r} R \quad (2.4)$$

$$V_{ab} = \frac{\varepsilon r}{1+r/R}$$

Tegangan terminal baterai nilainya sama dengan nilai tegangan beban R atau tegangan efektif baterai: $V_{ab} = V_{dc} = V_{eff} = iR$,

$$V_{ab} = \frac{\varepsilon}{R+r} R \text{ atau } V_{eff} = \frac{\varepsilon r}{1+r/R} \text{ sama dengan persamaan 2.4}$$

Contoh soal 2.1

- 1) Sebuah baterai dengan nilai EMF = 6 Volt dan tahanan dalamnya 1 Ohm untuk mensuplai rangkaian dengan nilai resistansi 10 Ohm. Berapa tegangan terminal baterai?

$$\text{Jawab: } V_{eff} = \frac{\varepsilon r}{1 + r/R} = \frac{6 \times 1}{1 + 1/10} = 5,45 \text{ volt}$$

- 2) Sebuah baterai radio transistor 9 volt bila dihubungkan dengan kawat tembaga mengalir arus 4 A (resistansi kawat diabaikan). Berapa a) Nilai tahanan dalam baterai, dan b) tegangan pada beban 10Ω ?

$$\text{Jawab: a) } r = \frac{\varepsilon}{I} = \frac{9}{4} = 2,25 \Omega$$

$$\text{b) } V_{eff} = V_{beban} = \frac{\varepsilon r}{1 + r/R} = \frac{9 \times 2,25}{1 + 2,25/10} = 7,3 \text{ V}$$

$$\text{atau dengan cara lain: } I = \frac{\varepsilon}{r+R} = \frac{9}{2,25+10} = 0,73 \text{ A}$$

$$V_{beban} = 0,73 \times 10 = 7,3 \text{ V}$$

- 3) Sebuah bola lampu senter dengan daya 6 W disuplai dayanya dengan baterai 3 V dan mempunyai tahanan dalam $0,25\Omega$. (Dimisalkan dengan penghantar ideal). Berapa daya yang diserap lampu dan berapa tegangan terminal baterai?

Jawab: a) Daya yang diserap lampu = 6 Watt

$$\text{b) } P = i^2 R$$

$$i = 3/(0,25 + R)$$

$$R^2 + 0,5R + 0,0625 = 1,5R$$

$$R^2 - R + 0,0625 = 0$$

$$R = 0,933 \Omega \text{ atau } R = 0,067 \Omega$$

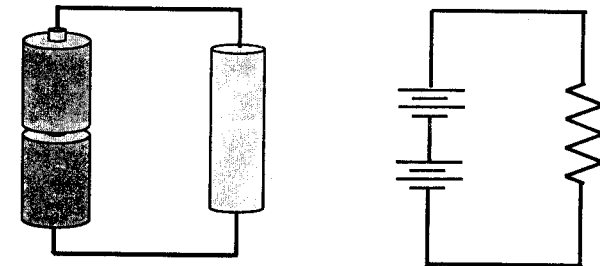
$$\text{Untuk } R = 0,933 \Omega \text{ maka } i = \frac{3}{0,933 + 0,25} = 2,54 \text{ Amp}$$

$$V_{eff} = V - ir = 3 - 2,54 \times 0,25 = 2,37 \text{ Amp}$$

C. Kombinasi Hubungan Baterai

1. Hubungan Seri

Bila beberapa baterai terhubung seri, tegangan total akan naik dan demikian juga energinya. Dengan nilai EMF yang sama untuk setiap baterai maka untuk sejumlah n baterai nilai EMF nya = $n\varepsilon$ Volt sedang tahanan dalam total = $n r$



Gambar 2.6 Hubungan baterai secara seri

Contoh soal 2.2

- 1) Empat buah baterai masing-masing 1,5 volt dan tahanan dalamnya 0,3 Ohm dipasang seri untuk menyuplai tahanan 12 Ohm. Berapa nilai arus yang lewat.

Jawab: EMF total = $1,5 \times 4 = 6$ Volt.

Tahanan dalam baterai total = $0,3 \times 4 = 1,2 \Omega$

$$\text{Nilai arus yang lewat } I = \frac{\epsilon}{r + R} = \frac{6}{12 + 1,2} = 0,455 \text{ Amp}$$

- 5) Tahanan dalam baterai merkuri $0,04\Omega$ dengan tegangan 1,35V sedang tahanan dalam baterai kering $0,05\Omega$ dengan tegangan 1,5V. Jelaskan mengapa 3 baterai merkuri dayanya lebih efisien dibandingkan dengan 3 baterai kering saat menyuplai alat bantu dengar dengan daya 2 W, 4V.

Jawab: EMF merkuri = $3 \times 1,35 = 4,05$ V

$$r = 3 \times 0,04 = 0,12\Omega$$

$$P_{\text{alat}} = \frac{V^2}{R} \rightarrow R = \frac{V^2}{P} = 8 \Omega$$

$$I = \frac{4,05}{0,12 + 8} = 0,5 \text{ A}$$

$$V_{\text{eff}} = 0,5 \times 8 = 4 \text{ V}$$

$$\text{Daya baterai merkuri yang hilang} = 0,5^2 \cdot 0,12 = 0,03 \text{ W}$$

$$\text{EMF baterai kering} = 3 \times 1,5 = 4,5 \text{ V}$$

$$r = 3 \times 0,05 = 1,5\Omega$$

$$I = \frac{4,05}{1,5 + 8} = 0,4736 \text{ A}$$

$$V_{\text{eff}} = 0,4736 \times 8 = 3,79 \text{ V}$$

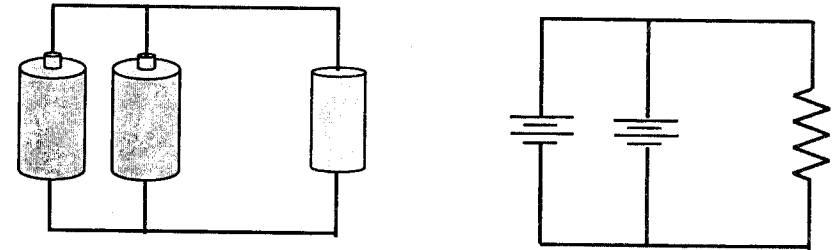
$$\text{Daya baterai yang hilang} = 0,4736^2 \cdot 1,5 = 0,336 \text{ W}$$

→ lebih besar dari baterai merkuri

Jadi baterai merkuri lebih efisien dibanding baterai kering

2. Hubungan Paralel,

Beberapa baterai terhubung paralel bila terminal-terminal baterai terhubung secara bersama untuk menyuplai beban seperti pada gambar 2.7



Gambar 2.7 Hubungan baterai secara paralel

Biasanya nilai ϵ setiap baterai sama sehingga untuk kombinasi paralel nilai EMF-nya juga sama dengan ϵ . Dalam hal ini hanya dimanfaatkan untuk menaikkan nilai arus total dan menaikkan nilai energi total.

Contoh soal

- 1) Lima buah accu masing-masing dengan EMF 24 Volt dan tahanan dalam masing-masing 1,8 Ohm dihubungkan secara paralel. Kombinasi ini digunakan untuk menyuplai beban dengan daya 384 Watt. Berapa nilai resistansi beban?

Jawab: Karena paralel EMF total = 24 Volt dan

$$\text{Tahanan dalam baterai total} = \frac{1,8}{5} = 0,36 \Omega$$

$$P = I^2 R$$

$$I = \frac{\epsilon_{\text{total}}}{R + r_{\text{total}}}$$

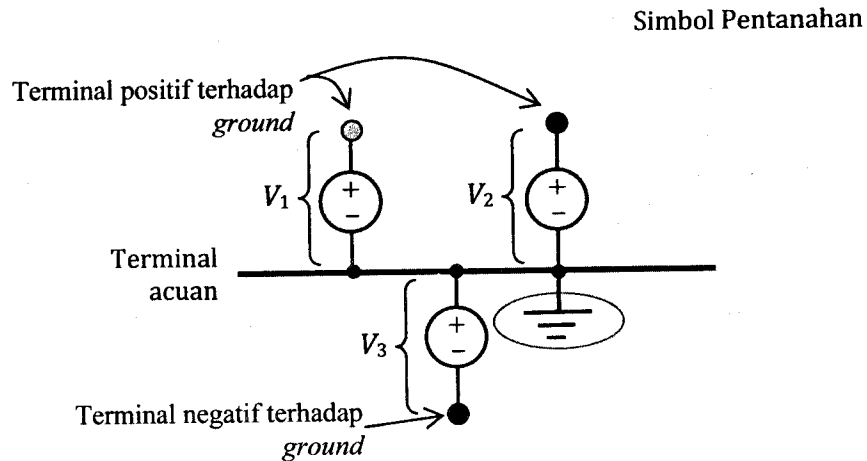
$$384 = \left(\frac{24}{R + 0,36} \right)^2 R \Rightarrow (R + 0,36)^2 = \frac{576}{384} R$$

$$\Rightarrow (R + 0,36)^2 = 1,5 R$$

$$R = 0,54 \Omega \text{ atau } R = 0,24 \Omega$$

2.2 Tegangan Acuan, *Ground*

Saat mengukur jatuh tegangan untuk sebuah komponen atau mengukur beda potensial pada komponen tersebut dengan cara membandingkan kedua titik atau terminal komponen.



Gambar 2.8 Sistem pentanahan (*Grounding*) untuk tegangan acuan nol volt

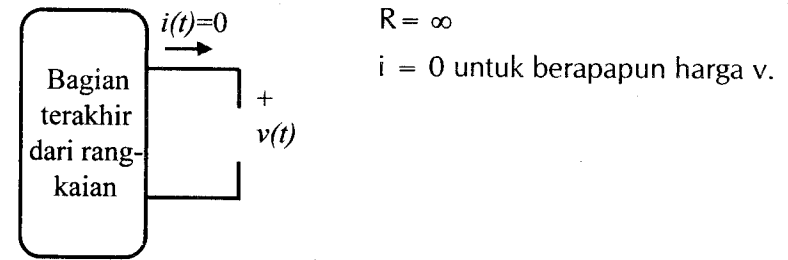
2.3 Rangkaian Terhubung Buka dan Terhubung Tutup

Salah satu metode analisis rangkaian yakni Teorema Thevenin atau Teorema Norton yang menggunakan analisis terhadap rangkaian terhubung buka ataupun rangkaian tertutup.

- Rangkaian Terhubung Buka

Bila dari sumber mengalir arus dengan harga arus nol maka sumber terhubung dengan rangkaian terbuka. Rangkaian terbuka mempunyai resistansi tak terhingga. Tegangan pada terminal sumber dengan $i(t)$

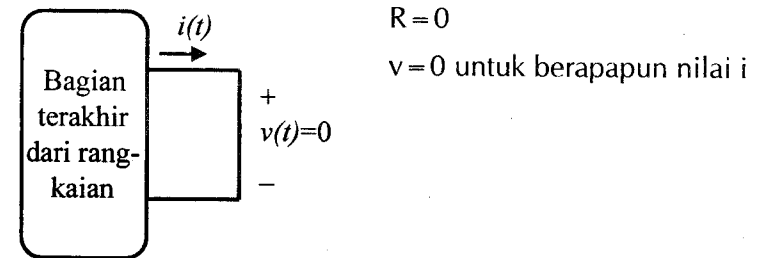
sama dengan nol dikatakan sebagai tegangan hubung buka: $v_{oc}(t)$ lihat gambar 2.9



Gambar 2.9 Rangkaian terhubung buka

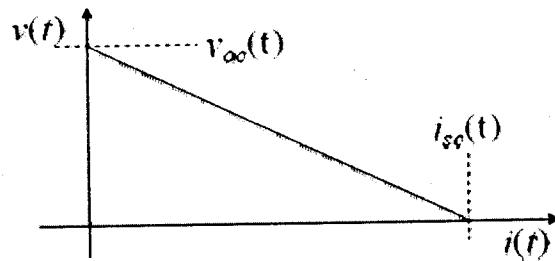
- Rangkaian Terhubung Singkat

Bila tegangan di antara terminal-terminal sumber bernilai nol maka sumber terhubung dengan rangkaian hubung singkat. Rangkaian tertutup mempunyai resistansi bernilai nol. Arus yang mengalir saat $v(t)$ sama dengan nol disebut arus hubung singkat: $i_{sc}(t)$ lihat gambar 2.10.



Gambar 2.10 Rangkaian terhubung singkat

Posisi tegangan $v_{oc}(t)$ saat terhubung buka dan arus $i_{sc}(t)$ saat terhubung singkat dapat dilihat dari kurva pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Tegangan hubung buka dan arus hubung singkat

2.4 Elemen Pasif

Elemen II pada gambar 2.1 yang dikatakan sebagai beban adalah elemen pasif, yakni elemen yang hanya bisa menerima/menyerap atau menyimpan energi umumnya sebagai panas, pada elemen ini arus mengalir dari potensial tinggi ke potensial rendah. Contoh elemen pasif adalah resistor, kapasitor dan induktor.

Tabel 3.1 Simbol-simbol elemen pasif

Nama	Lambang	Persamaan	
Resistor		$\Delta V = IR$	(2.5)
Induktor		$V = L \frac{di}{dt}$	(2.6)
Kapasitor		$I = C \frac{dv}{dt}$	(2.7)

Berdasar hubungan tegangan dan arus pada elemen pasif dibedakan atas,

- 1) Pada rangkaian tanpa elemen penyimpan energi (contoh: resistor), tegangan dan arus merupakan kombinasi linier dari sumber-sumber tegangan dan arus.

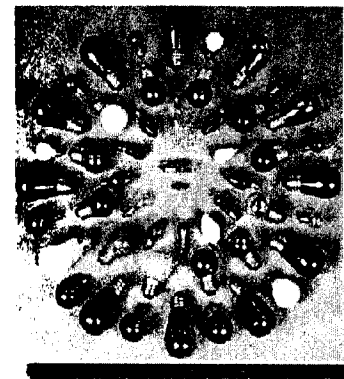
- 2) Pada rangkaian dengan elemen penyimpan energi (contoh: kapasitor dan induktor) penyelesaian dibuat linier dan merupakan persamaan diferensial dengan koefisien konstan. Hal ini terjadi karena energi tidak dapat berubah secara sesaat. Rangkaian dengan elemen penyimpan energi akan merespon secara dinamis perubahan tegangan dan arus terhadap waktu.

Pada sinyal frekuensi tinggi, induktansi dan kapasitansi berpengaruh lebih signifikan dibanding resistansi. Pada sistem pemrosesan sinyal, sistem komunikasi dan instrumentasi akan dijumpai penggunaan kapasitor dan induktor dengan merakit filter dan amplifier yang diinginkan untuk merespon frekuensi, antara lain Amplifier RF dan IF pada penerima superheterodin. Pada beban kelistrikan elemen penyimpan energi untuk kapasitor sebagai model pada komputer dan catu daya (*power supply*) sedang induktor adalah model dari motor.

Kapasitor dan induktor digunakan untuk membangun filter dan amplifier dengan respon frekuensi yang diinginkan pada:

- Amplifier RF dan IF pada penerima superheterodin
- Amplifier instrumentasi

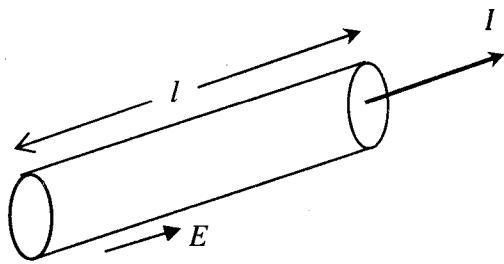
a. Resistansi



Gambar 2.12 Bola lampu sebagai model resistensi

Resistansi adalah sifat melawan dari material terhadap arus yang mengalir di dalam rangkaian. Di-manfaatkan sebagai kontrol jumlah tegangan dan/atau nilai arus dalam rangkaian.

Segala sesuatu dalam rangkaian (bahkan penghantar) menyebabkan resistansi. Model yang terlihat nyata untuk resistor adalah elemen-elemen pemanas, bola lampu (gambar 2.12) dan tentu saja kawat penghantar.



Gambar 2.13 Penghantar yang dialiri listrik

Resistansi adalah perbandingan antara beda potensial terhadap arus.

Nilai resistansi dipengaruhi oleh jenis material, terukur dalam Ohms (Ω). Dari Gambar 2.13 bila ada beda potensial antara a dan b sebesar:

$$V_{ab} = E l \quad (2.8)$$

$$\text{Kuat medan } E = \mathfrak{I} \rho \quad (2.9)$$

$$\text{Kerapatan arus: } \mathfrak{I} = \frac{I}{A} \quad (2.10)$$

$$\text{maka kuat medan: } E = \frac{I}{A} \rho \quad (2.11)$$

ρ = resistivitas - $\Omega \text{ m}$ nilainya tergantung jenis material

$$\text{Contoh: } \rho_{\text{tembaga}} = 1,72 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$$

$$\rho_{\text{aluminium}} = 2,62 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$$

$$\rho_{\text{stainless steel}} = 9,09 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$$

Berdasarkan hukum Ohm $V_{ab} = RI$

maka

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.12)$$

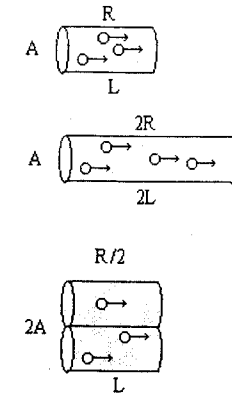
$$V_{ab} = \frac{\rho l}{A} I \quad (2.13)$$

R = resistansi atau nilai hambatan - Ohm

$R \approx 0$ adalah konduktor ideal

$R = \infty$ adalah isolator ideal

$R < 0$ adalah NRD atau Negative Resistance Device contoh: diode terowongan (tunnel diode)



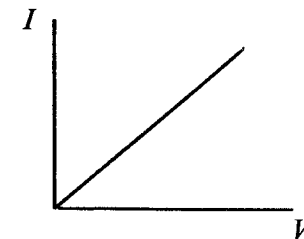
Gambar 2.14 Berbagai harga R dengan berbagai jenis dimensi penghantar

Untuk analisis rangkaian listrik maka resistansi dinyatakan dalam bentuk lambang resistor sebagai gambar 2.15.

Persamaan 2.13 menyatakan bahwa hubungan antara arus dan tegangan pada resistansi bersifat linier tergambar pada gambar 2.16.

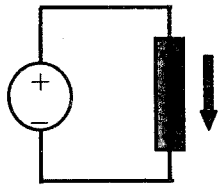


Gambar 2.15 Lambang resistor



Gambar 2.16 Hubungan tegangan dan arus pada resistansi

Konduktansi G dengan perhitungan, lihat gambar 2.17.



Gambar 2.17 Hubungan konduktansi terhadap arus dan tegangan

$$G = \frac{1}{R} = \frac{\sigma A}{\ell} \quad (2.14)$$

G = Konduktansi – Siemens (Si)

$$\sigma = \text{konduktivitas} = \frac{1}{\rho} \quad (2.15)$$

Nilai resistansi bergantung pada temperatur sebab panas akan menambah nilai energi pada atom-atom sehingga elektron-elektron lebih mudah melepaskan diri.

Nilai perubahan resistansi terhadap resistansi awal sebagai pada persamaan 2.16,

$$R_t = R_o \{1 + \alpha(T_t - T_o)\} \quad (2.16)$$

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{R_t - R_o}{T_t - T_o} \quad (2.17)$$

R_t = Nilai resistansi pada suhu t

R_o = Nilai resistansi pada suhu 0°K

T_o = suhu 0°K

T_t = suhu akhir

α = koefisien suhu

Daya yang didisipasi resistansi lihat juga persamaan 1.15 pada bab 1.

$$p = vi = (Ri)i = i^2 R = \frac{V^2}{R} \text{ Watt} \quad (2.18)$$

Contoh soal 2.3

- 1) Sebuah resistansi 5Ω disuplai oleh tegangan $v = 2 \sin 100t$ Volt. Berapa nilai arus yang mengalir dan berapa nilai konduktansinya.

Jawab:

$$a) i = \frac{V}{R} = \frac{2 \sin 100t}{5} = 0,4 \sin 100t \text{ Amp.}$$

$$b) G = \frac{1}{R} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ Siemens}$$

- 2) Sebuah termometer terbuat dari jenis resistansi berbahan platina pada 0°C menunjukkan angka $164,2 \Omega$. Saat ditempelkan pada kulit seekor domba nilai resistansinya menjadi $187,4 \Omega$. Berapa temperatur binatang tersebut?

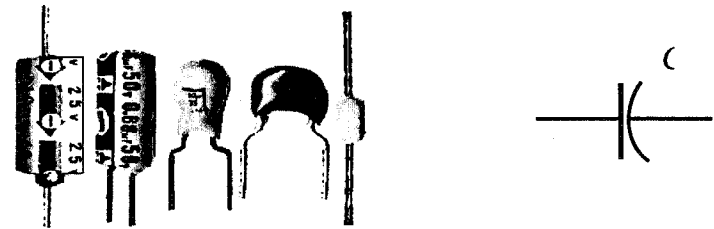
Jawab: $R_t = R_o \{1 + (T_t - T_o)\}$

$$187,4 = 164,2 \{1 + 0,003927(T_t - T_o)\}$$

$$T_t = \frac{187,4 - 164,2}{0,003927 \times 164,2} = 35,9^\circ \text{C}$$

B. Kapasitansi

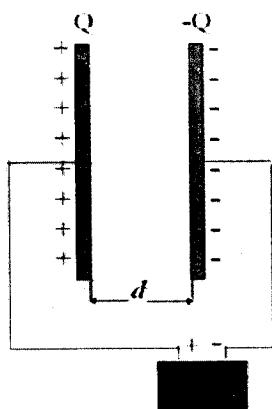
Kapasitansi adalah piranti penyimpan energi dalam medan listrik statis, merupakan salah satu faktor pembatas untuk kecepatan prosesor. Ada berbagai jenis kapasitor salah satu jenis kapasitor terlihat pada gambar 2.18a), sedang lambang kapasitor pada gambar 2.18b)



Gambar 2.18 a) Jenis kapasitor elektrolit b) Lambang kapasitor

Kapasitor terbuat dari dua plat paralel dari material semikonduktor dengan daya hantar tinggi terpisah dengan jarak tertentu. Diantara kedua plat disuplai oleh sumber tegangan sehingga besar muatan sama tetapi berbeda tanda. Di antara ke dua plat kemungkinan terisi

suatu material semikonduktor misalnya silikon dioksida (SiO₂) yang disebut dielektrik tetapi juga dimungkinkan kosong hanya berisi udara, lihat gambar 2.19.



Gambar 2.19 Susunan dasar kapasitor

Selama tegangan yang disuplai konstan maka muatan akan tetap tersimpan tetapi arus tidak mengalir. Bila tegangan berubah terhadap waktu maka arus akan mengalir sebanding dengan kecepatan perubahan tegangan sesuai dengan persamaan 2.20.

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (2.20)$$

Persamaan ini sebenarnya merupakan turunan dari (2.19). Buktikan!

Energi yang tersimpan dalam kapasitor dengan $v = 0$ pada saat $t = 0$ adalah

$$\begin{aligned} wC &= \int_0^T vC \frac{dv}{dt} dt = \\ &= \int_0^v Cv dv = \frac{1}{2} CV^2 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Kemampuan menyimpan tenaga dalam medan listrik dinyatakan dengan nilai

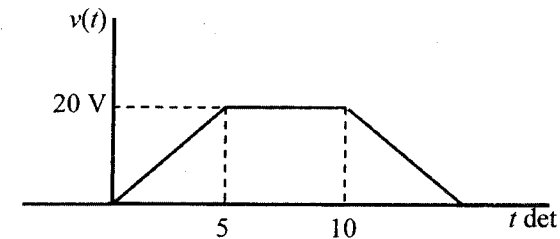
$$C = \frac{q}{v} \quad (2.19)$$

Kapasitansi C – Farad

q = Besar muatan – Coulomb

V = tegangan – Volt

Contoh soal 2.4

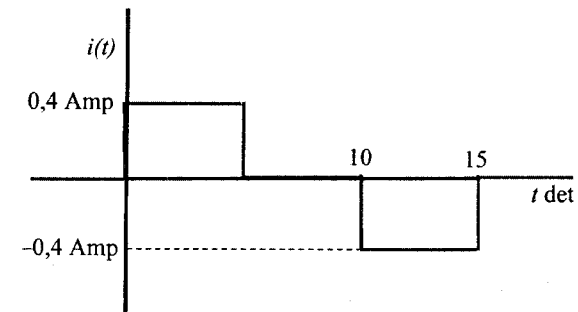


Gambar 2.20 Kurva tegangan

- 1) Gambarkan kurva arus yang melalui sebuah kapasitor 0,1 F bila kurve tegangan sebagai pada gambar 2.20!

Jawab: berdasar persamaan 2.20 maka

$$i = C \frac{dv}{dt} = C \frac{v_1 - v_2}{t_1 - t_2} \quad (2.22)$$



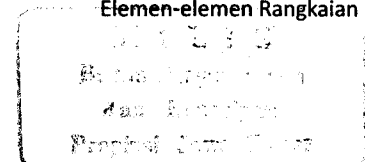
Gambar 2.21 Kurva tegangan untuk jawaban soal nomor 1 pada contoh soal 2.3

Sehingga harga i dapat dihitung:

$$-\infty < t < 0 \Rightarrow i = 0,1 \frac{0-0}{0-\infty} = 0$$

$$0 < t < 5 \Rightarrow i = 0,1 \frac{20-0}{5-0} = 0,4 \text{ Amp}$$

$$5 < t < 10 \Rightarrow i = 0,1 \frac{20-20}{10-0} = 0$$



$$10 < t < 15 \Rightarrow i = 0,1 \frac{0-20}{15-10} = -0,4 \text{ Amp}$$

$$15 < t < \infty \Rightarrow i = 0,1 \frac{0-0}{\infty-0} = 0$$

Bentuk kurva yang diperoleh seperti pada gambar 2.21

- 2) Kapasitor 500 μF disuplai dengan tegangan $v = 2 \sin 1000t$ Volt. Berapa nilai arus yang mengalir

$$\text{Jawab: } i = C \frac{dv}{dt} = 5 \times 10^{-6} \frac{d2\sin 1000t}{dt}$$

$$i = 10 \times 10^{-2} \cos 1000t$$

$$i = 0,1 \cos 1000t \text{ Amp}$$

- 3) Sebuah kapasitor 0,05 F dilepas muatannya saat $t = 0$. Suplai tegangannya $4(1-e^{-4t})$ Volt. Berapa nilai arus pada $t \geq 0$

$$\text{Jawab: } i = C \frac{dv}{dt} = 5 \times 10^{-2} \frac{d4(1-e^{-4t})}{dt}$$

$$= \frac{0,2 d(1-e^{-4t})}{dt} = 0,2 \cdot 4 \cdot (e^{-4t})$$

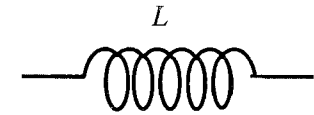
$$= 0,8 e^{-4t} \text{ Amp}$$

- 4) Sebuah lampu kilat kamera menyimpan energi pada kapasitor 150 μF pada 200 V. Berapa banyak energi listrik yang disimpan.

$$\text{Jawab: } w_C = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} 150 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot 10^2)^2 = 300 \cdot 10^{-2} = 3 \text{ Joule}$$

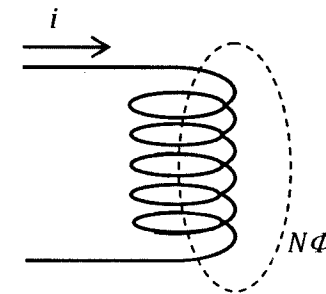
C. Induktansi

Induktor adalah piranti penyimpan energi dalam medan magnet. Bentuk riil induktor seperti pada gambar 2.24a) sedang lambang induktor pada gambar 2.24b)



Gambar 2.22 a) Bentuk riil induktor b) Lambang induktor

Induktor terbuat dari kawat tembaga yang berbentuk kumparan seperti terlihat pada gambar 2.23. Bila kumparan disuplai oleh sinyal generator maka arus akan mengalir dalam kumparan, sehingga terjadi tegangan yang diinduksikan pada kumparan yang nilainya sebanding dengan kecepatan perubahan arus yang mengalir dalam kumparan. Hubungan antara tegangan dan arus digambarkan oleh persamaan (2.23).



$$L = \frac{N\Phi}{i} \Rightarrow Li = N\Phi \quad (2.23)$$

$$EMF = -N \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (2.24)$$

L = nilai induktansi diri – Henry

Harga tegangan yang dibangkitkan adalah

Gambar 2.23 Suplai arus pada Induktor

$$v = L \frac{di}{dt} = C \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1} \quad (2.25)$$

Energi yang tersimpan dalam induktor dengan $v = 0$ pada saat $t = 0$ adalah

$$w_L = \int_0^T Li \frac{di}{dt} dt = \int_0^i Li di = \frac{1}{2} Li^2 \quad (2.26)$$

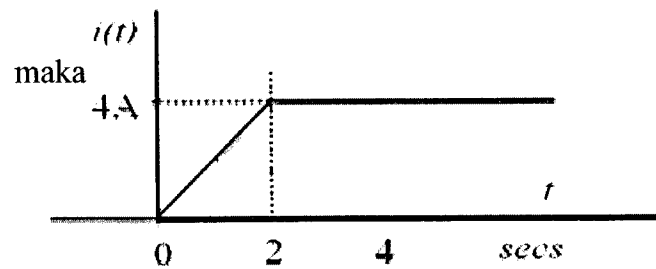
Contoh soal 2.5

- 1) Arus dengan nilai $i = 5 \sin 100t$ Amp mengalir melalui induktansi sebesar 20 mH Hitung tegangan, dan daya sesaat pada induktor tersebut.

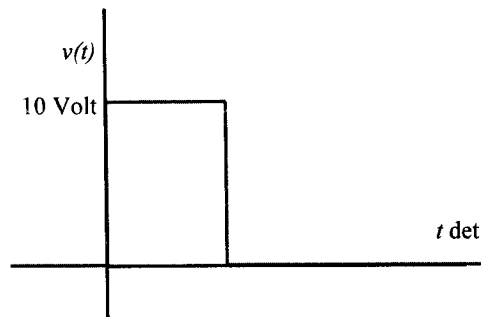
Jawab: a) $v = L \frac{di}{dt} = 20 \cdot 10^{-3} \frac{d5 \sin 100t}{dt} = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 100 \cos 100t$
 $= 10 \cos 100t = 10 \sin(100t + 90^\circ)$ Volt

b) $p(t) = 10V \sin(100t) \cdot 5A \cos(100t)$

- 2) Gambarkan kurva tegangan untuk induktor 5H dengan kurva arus sebagai pada gambar 2.24



Gambar 2.24 Kurva arus untuk soal nomor 2



Gambar 2.25 Kurva tegangan untuk jawaban soal 2

Jawab: berdasar persamaan 2.19 maka $v = L \frac{di}{dt} = L \frac{i_1 - i_2}{t_1 - t_2}$

Sehingga harga i dapat dihitung:

$$-\infty < t < 0 \Rightarrow v = 5 \frac{0-0}{0-\infty} = 0$$

$$0 < t < 2 \Rightarrow v = 5 \frac{4-0}{2-0} = 10$$

$$2 < t < \infty \Rightarrow v = 5 \frac{4-4}{\infty-2} = 0$$

Bentuk kurva tegangan yang diperoleh dapat dilihat pada gambar 2.25.

- 3) Arus yang mengalir melalui induktor 1H sebesar $i(t) = 0,5A \cos(2\pi 60t)$, berapa $v(t)$, $p(t)$, dan gambarkan kurva-kurangnya.

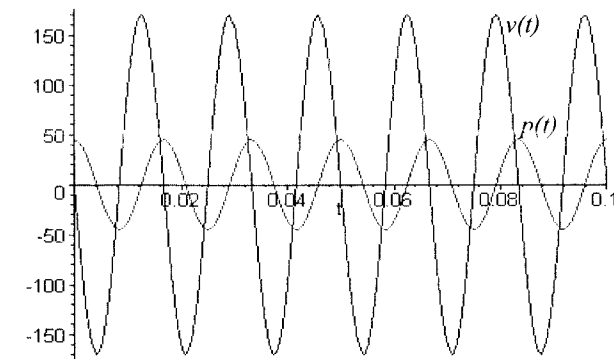
Jawab: a) $v(t) = L \frac{di(t)}{dt} = -1H \cdot 0,5 \cdot 2\pi 60 \sin(2\pi 60t)$

$$v(t) = -188,4 \cos(2\pi 60t) \text{ Volt}$$

$$p(t) = -188,4 \text{ V} \sin(2\pi 60t) \cdot 0,5 \text{ A} \cos(2\pi 60t)$$

$$p(t) = -47,1 \sin(4\pi 60t) \text{ Watt}$$

Dari jawaban a) dapat dibuat bentuk kurvenya seperti pada gambar 2.27



Gambar 2.26 Kurva tegangan dan daya pada induktor

d. Respon Kapasitor dan Induktor Terhadap Suplai DC

1. Respon Kapasitor.

Respon Kapasitor terhadap suplai DC dapat dianalisis sebagai berikut:

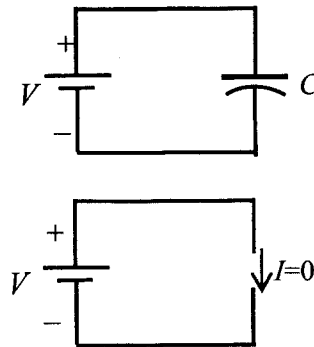
Misal dengan suplai tegangan $V = 10$ Volt, sehingga harga arus yang lewat dapat dihitung:

$$i = C \frac{dv}{dt} \rightarrow i = C \frac{d10}{dt}$$

$$i = 0$$

$$\text{atau arus DC} \rightarrow I_{DC} = 0$$

dengan nilai $i = 0$ maka rangkaian dikatakan terhubung buka seperti pada gambar 2.27.



Gambar 2.27 a) Kapasitor dengan suplai DC b) Rangkaian terhubung buka

2. Respon Induktor terhadap suplai DC.

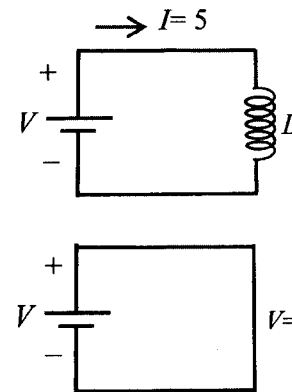
Misal arus yang mengalir $I = 5$ Amp., sehingga harga tegangan pada induktor dapat dihitung:

$$v = L \frac{di}{dt} \rightarrow v = L \frac{d5}{dt}$$

$$v = 0$$

$$\text{atau tegangan DC} \rightarrow V_{DC} = 0$$

dengan tegangan $V = 0$ maka rangkaian terhubung tutup seperti pada gambar 2.26



Gambar 2.28 a) Induktor dilalui arus DC b) Rangkaian terhubung tutup

2.5 Daftar Pustaka

- Boylestad, Robert, *Introductory Circuit Analysis*, Prentice Hall, Inc. 1997
- Edminister, Joseph A., *Theory and Problem Of Electric Circuit in S.I. Unit*, New York: McGraw Hill, 1972.
- Floyd, Thomas, F., *Principles of Electric Circuit*, Prentice Hall, 2000.
- Hayt Jr., William H.; Kemmerly, Jack E., *Engineering Circuit Analysis*, McGraw-Hill, Inc., 1993.
- Johnson, David E., *Basic Electric Circuit Analysis*, Prentice Hall, Inc. 1995
- Mismail, Budiono, *Dasar Teknik Elektro*, Bayu Media Publishing 2006.
- Paul, C.R., *Introduction To Electrical Engineering*, McGraw-Hill, Inc., 1992.
- Rizzoni, Giorgio., *Principles and applications of Electrical Engineering*, Third edition, McGraw-Hill, 2000
- Ryder, John D., *Electrical and Electronic Engineering*, McGraw-Hill Book Company, 1967
- Smith, R. J. *Circuits, Devices and Systems*. New York: John Wiley and Sons Inc., 1972.

-oo0oo-

Untai Listrik

Pada bab ini akan dijelaskan tentang untai listrik serta elemen-elemen yang ada pada untai listrik. Untuk selanjutnya akan dibahas analisis rangkaian sederhana dengan demikian akan dapat mengevaluasi transformasi energi dari elemen-elemen.

Dalam kondisi riil ada berbagai jenis jaringan yang identik dengan metode analisis yang sama, sebagai contoh untuk berbagai jenis jaringan serta komponen dan jenis penghantarnya seperti dalam tabel 3.1

Tabel 3.1 Jenis-jenis elemen, nama jaringan dan jenis penghantarnya

Elemen	Nama Jaringan	Jenis Penghantar
Komponen listrik	Rangkaian	Kawat
Komputer	Internet	Fiber Optik
Organ tubuh	Sistem sirkulasi	Katup darah

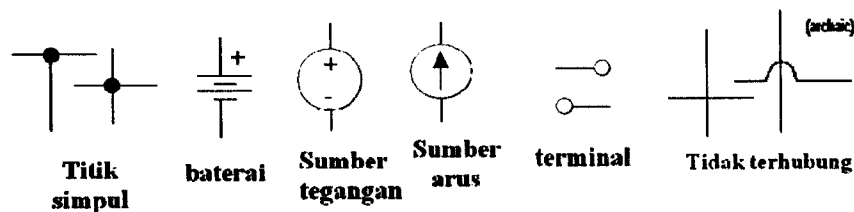
Untuk penyelesaian sebuah rangkaian akan dipelajari hukum Kirchoff tentang arus dan tegangan dalam rangkaian.

3.1 Definisi Untai Listrik

Untai listrik adalah interkoneksi beberapa elemen lewat simpul dan cabang sehingga arus dapat mengalir secara kontinu. Variabel-variabel yang berperan adalah arus dan tegangan pada berbagai titik sepanjang rangkaian.

Untai listrik mempunyai tiga bagian dasar:

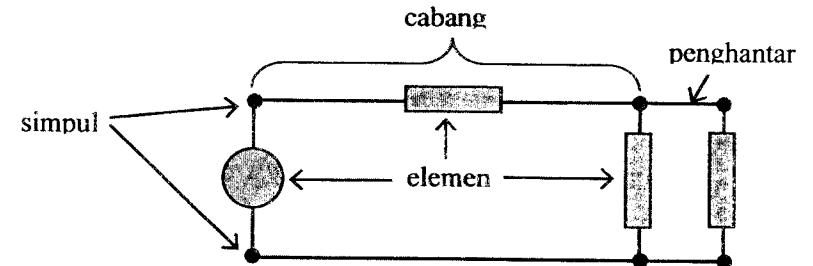
- Sebuah sumber untuk suplai energi listrik, misalnya baterai atau generator.
- Piranti keluaran atau beban, contohnya motor atau lampu.
- Penghubung antara sumber dan beban, misalnya kawat atau kabel.
- Untuk rangkaian yang kompleks mungkin juga ada bagian masukannya.
- Beberapa ketentuan dan simbol-simbolnya lihat gambar 3.1.



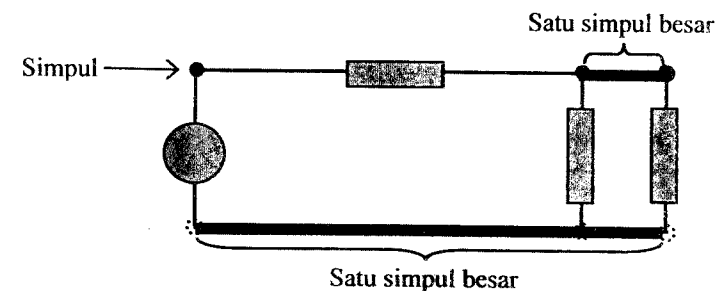
Gambar 3.1 Simbol-simbol dalam rangkaian

3.2 Topologi Jaringan

Sebuah susunan interkoneksi dari komponen-komponen listrik disebut jaringan. Lihat gambar 3.2. Setiap komponen dari jaringan disebut elemen. Masing-masing elemen terhubung oleh penghantar. Interkoneksi penghantar disebut simpul. Jejak penghubung di antara dua titik simpul disebut cabang.



Gambar 3.2 Untai listrik dengan simpul, cabang, penghantar dan elemen



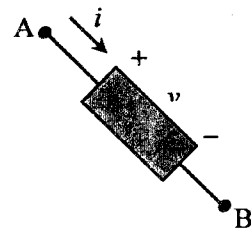
Gambar 3.3 Untai listrik dengan 3 simpul

Dua titik simpul tanpa elemen di antaranya disebut satu simpul besar, sebagai terlihat pada gambar 3.3.

Penetapan besar dan arah arus dengan melihat gambar 3.4.

Bila di antara dua terminal A dan B atau pada cabang A-B dipasang elemen, mungkin resistor, induktor ataupun kapasitor. Maka dapat ditetapkan acuan untuk arah tegangan berdasarkan tanda + dan

– yang diletakkan dekat terminal A dan B. Tanda-tanda + dan – disebut polaritas.



Gambar 3.4 Ketentuan besar dan arah arus

Arus mengalir pada cabang dari terminal A ke terminal B karena ada beda potensial di mana potensial di A lebih tinggi dibanding potensial di B. Acuan untuk arah arus digambarkan dengan tanda panah.

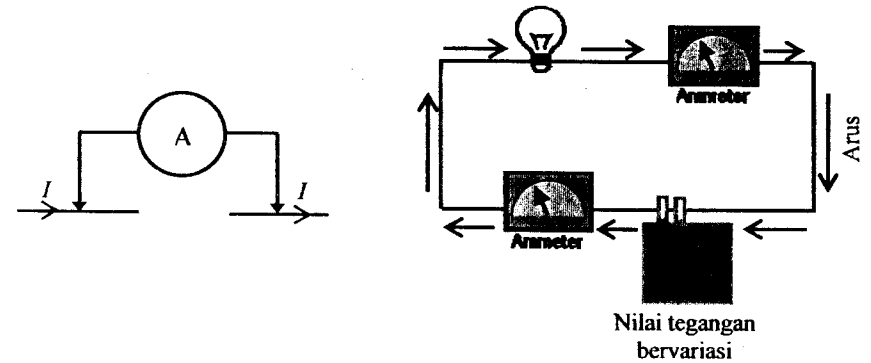
Dengan arah acuan yang ditetapkan untuk tegangan seperti pada gambar 3.4 maka tegangan pada cabang v adalah positif saat waktu t (yakni, $v(t) > 0$). Saat potensial listrik di A lebih besar dari potensial listrik di B pada waktu t .

$$v(t) = v_A(t) - v_B(t) \quad (3.1)$$

3.3 Penggunaan Alat Ukur

a. AMPEREMETER

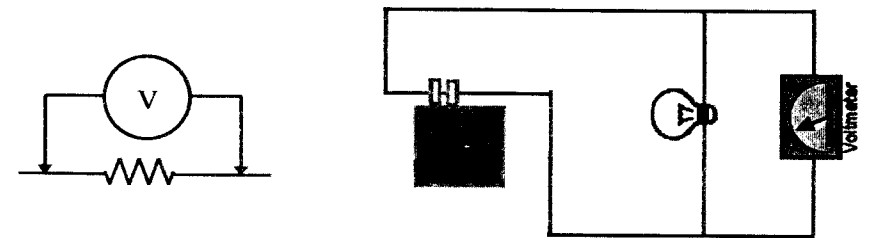
Digunakan untuk mengukur nilai arus yang lewat sebuah elemen dengan cara ammeter dipasang secara seri dengan elemen sebagai gambar III. Penunjukkan angka pada amperemeter atau ammeter sama untuk posisi di mana saja dalam satu cabang.



Gambar 3.5 Penempatan Ammeter dalam rangkaian

b. VOLTMETER

Digunakan untuk mengukur jatuh tegangan pada sebuah elemen dengan cara memasang Voltmeter secara paralel dengan elemen



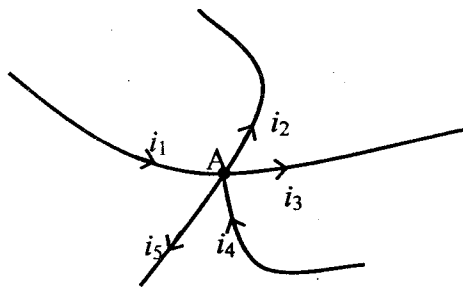
Gambar 3.6 Penempatan Voltmeter dalam rangkaian

3.4 Hukum Kirchoff

a. Hukum Kirchoff Tentang Arus (*Kichoff Current Law = Kcl*)

Jumlah aljabar arus yang masuk pada sebuah titik simpul sama dengan nol. Atau jumlah arus yang masuk pada sebuah titik simpul sama dengan jumlah arus yang keluar dari titik simpul tersebut.

Secara matematis dituliskan: $\sum_k I_k = 0 \quad (3.2)$



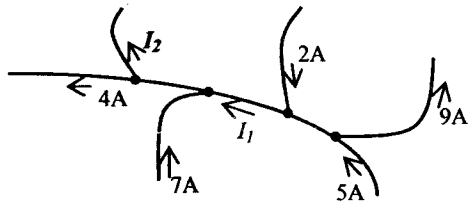
Gambar 3.7 Kondisi arus pada simpul A

Dengan ketentuan arus yang masuk titik simpul bernilai positif dan arus yang keluar titik simpul bernilai negatif, maka KCL titik simpul A dari gambar 3.7 adalah,
 $i_1 - i_2 + i_3 + i_4 - i_5 = 0$

Contoh soal 3.1

- 1) Hitung harga arus I_1 dan I_2 yang ada pada gambar 3.8

Jawab:

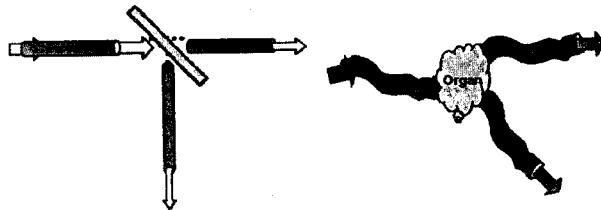


Gambar 3.8 Susunan simpul untuk contoh soal 1

$$I_1 = +2 + 5 - 9 = -2A$$

$$I_2 = -2 + 7 - 4 = 1A$$

Persamaan arus dari Hukum Kirchoff tentang arus dapat diidentikkan pada jaringan lain misal cahaya atau aliran darah seperti pada gambar 3.9



Gambar 3.9 Jaringan pencahayaan dan edaran darah

b. Hukum Kirchoff Tentang Tegangan (Kichoff Voltage Law = Kvl)

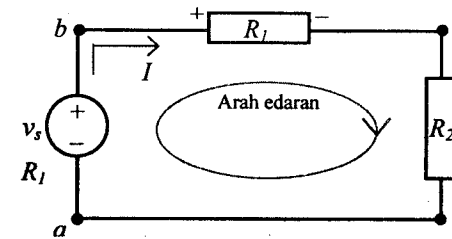
Jumlah aljabar tegangan pada suatu edaran tertutup sebuah rangkaian listrik sama dengan nol.

Secara matematis dituliskan:

$$\sum_{abca} v_{abca} = 0 \quad (3.3)$$

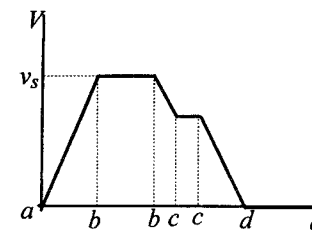
atau:

$$V_a + V_{bc} + V_{cd} + V_{da} = 0 \quad (3.4)$$



Gambar 3.10 Rangkaian sederhana abcd

Karena di antara simpul a dan d tidak ada elemen maka potensial di a sama dengan potensial di d sehingga $v_{da} = 0$ dan arus yang lewat elemen R_1 dan R_2 merupakan jatuh tegangan maka KVL edaran tertutup abcd dari rangkaian gambar 3.10:



$$v_s - IR_1 - IR_2 + 0 = 0 \text{ sehingga}$$

$$v_s - IR_1 - IR_2 = 0$$

Untuk pergerakan arus dari potensial rendah di a ke potensial tinggi di b maka perlu tambahan energi sehingga bernilai positif.

Gambar 3.11 Grafik tegangan untuk rangkaian abcdefa pada gambar 3.12

Pada setiap elemen pasif arus mengalir dari potensial tinggi ke potensial rendah atau terjadi pengurangan energi. Kondisi ini dapat digambarkan dalam bentuk grafik tegangan seperti pada gambar 3.11.

Bila persamaan $v_s - IR_1 - IR_2 = 0$ dikalikan dengan tanda (-) diperoleh persamaan:

$$-v_s + IR_1 + IR_2 = 0$$

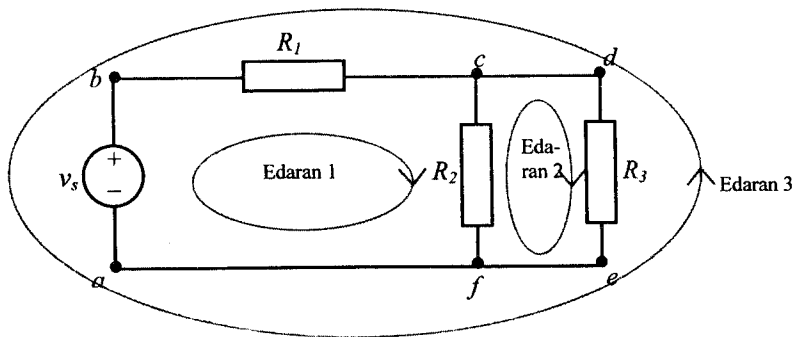
Atau $IR_1 + IR_2 = v_s$

Persamaan ini memunculkan ketentuan sebagai berikut:

- Pada elemen aktif atau suplai daya, tegangan akan bernilai + bila arus masuk ke terminal dengan polaritas + dan tegangan bernilai - bila arus masuk pada terminal dengan polaritas -.
- Pada elemen pasif tegangan bernilai + untuk arus yang masuk elemen pasif atau bila arah arus searah dengan arah edaran maka tegangan bernilai + dan bila arah arus melawan arah edaran maka tegangan bernilai -.

Contoh soal 3.2

- 1) Ada berapa simpul dan ada berapa edaran untuk rangkaian gambar 3.12 dan tuliskan persamaan edarannya



Gambar 3.12 Rangkaian sederhana abcda

Jawab:

- a) Ada 3 simpul yakni simpul b , simpul besar cd dan simpul besar afe .

b) Ada 3 edaran: edaran $abcfa$, edaran $fcdef$ dan edaran $edcbafe$.

Persamaan edaran 1, dengan menetapkan potensial di b lebih tinggi dari potensial di c maka: $-v_s + v_{bc} + v_{cf} = 0$

atau $v_{bc} + v_{cf} = v_s$

Persamaan edaran 2 dengan menetapkan potensial di c dan d lebih tinggi dari potensial di e dan f maka: $v_{de} - v_{fc} = 0$

atau $v_{de} = v_{fc}$

membuktikan bahwa pada rangkaian yang paralel, tegangan pada elemen-elemennya sama, persamaan edaran 3:

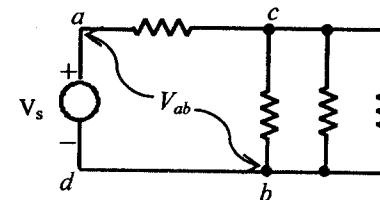
$$-v_{ed} - v_{cb} + v_s = 0$$

atau $-v_{ed} - v_{cb} = -v_s$

dan $v_{de} + v_{bc} = v_s$, sama dengan persamaan edaran 1

Dengan demikian untuk menyelesaikan masalah pada rangkaian seperti pada gambar 3.12 dapat memilih antara edaran 1 atau edaran 3.

- 2) Tetapkan nilai tegangan ab (V_{ab}) dari rangkaian pada gambar 3.13.



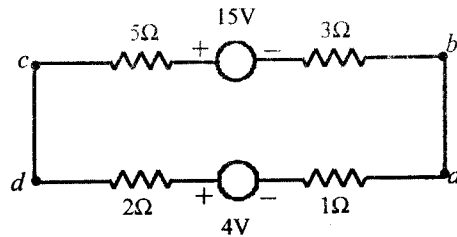
Gambar 3.13 Rangkaian untuk contoh soal no 2

Seolah-olah ada edaran $abda$ sehingga

$$V_{ab} + V_{bd} - V_{da} = 0$$

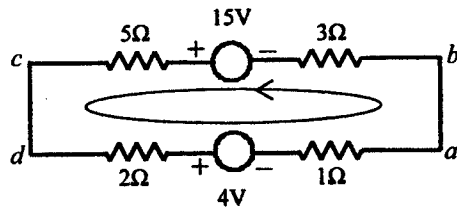
Karena $V_{bd} = 0$ dan $V_{da} = v_s$ jadi $V_{ab} = v_s$

- 3) Dari rangkaian gambar 3.14 buat persamaan edarannya dan berapa harga arus yang mengalir dalam rangkaian



Gambar 3.14 Rangkaian untuk contoh soal no 3

Jawab: bila arah edaran sebagai pada gambar 3.15



Gambar 3.15 Rangkaian untuk contoh soal no 3

$$\sum_{abca} v_{abca} = 0$$

a) Persamaan edarannya adalah:

$$+ 3I - 15 + 5I + 2I + 4 + I = 0$$

$$11I = 11$$

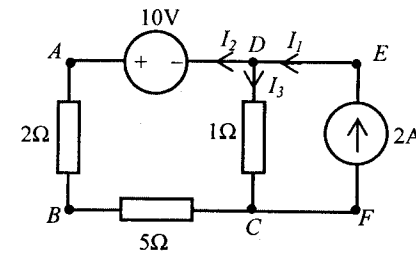
b) $I = 1$ Amp.

Aplikasi untuk KVL dan KCL secara bersama digunakan untuk analisis rangkaian yang lebih kompleks.

4) Dari rangkaian gambar 3.16, berapa nilai tegangan V_{AC} ?

Jawab: $I_1 - I_2 - I_3 = 0$ $I_1 = 2$ Amp

$$I_2 + I_3 = 2 \text{ atau } I_3 = 2 - I_2$$



Gambar 3.16 Rangkaian untuk contoh soal no 4

$$\sum_{abca} v_{abca} = 0$$

$$2I_2 + 5I_2 - 1I_3 - 10 = 0$$

$$7I_2 - (2 - I_2) = 10$$

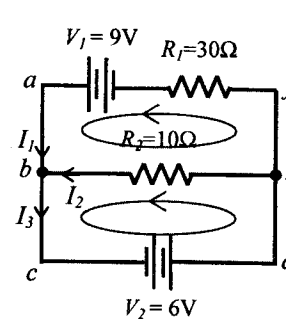
$$I_2 = 1,5 \text{ A dan } I_3 = 0,5 \text{ A}$$

$$\sum_{acda} v_{acda} = 0$$

$$V_{AC} - 1I_3 - 10 = 0 \rightarrow V_{AC} = 10,5 \text{ V.}$$

5) Berapa nilai arus yang mengalir pada masing-masing R dari rangkaian gambar 3.18.

Jawab: Arus yang mengalir di R_1 adalah I_1 dan arus yang mengalir di R_2 adalah I_2



$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$\sum_{bcdeb} v_{bcdeb} = 0$$

$$-6 + 10 I_2 = 0 \rightarrow I_2 = 0,6 \text{ A.}$$

$$\sum_{abefa} v_{abefa} = 0$$

$$-9 - 10 I_3 + 30 I_1 = 0$$

Gambar 3.17 Rangkaian untuk contoh soal no 5

$$-9 - 10 \times 0,6 + 30 I_1 = 0 \rightarrow I_1 = 0,5 \text{ A.}$$

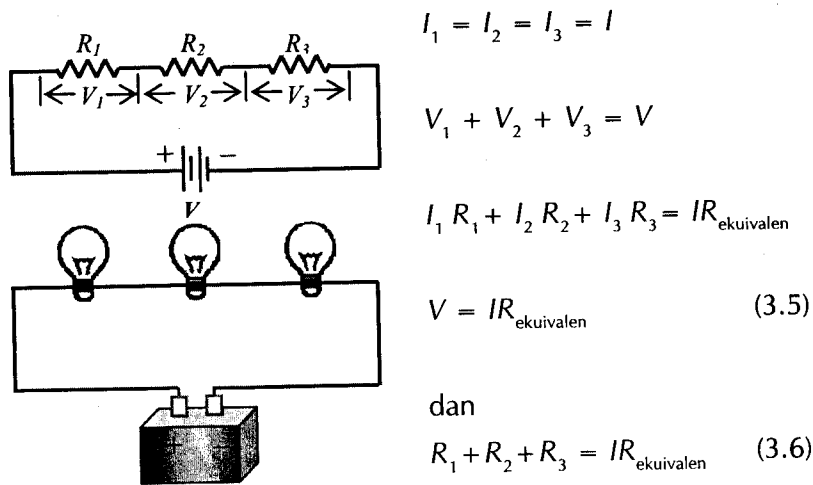
3.5 Kombinasi Hubungan Resistansi

Kombinasi hubungan resistansi seri dan paralel dapat dikatakan sebagai rangkaian pembagi arus dan pembagi tegangan.

a. Hubungan Resistansi Seri

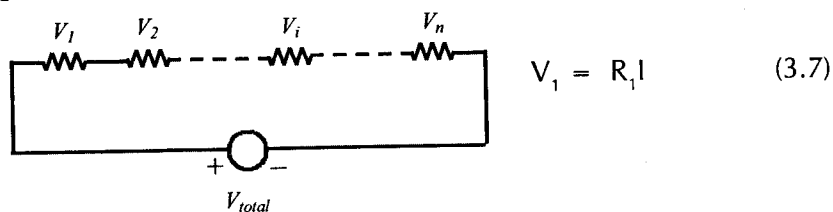
Bila resistor dihubungkan secara seri akan menghasilkan nilai resistansi yang lebih besar dibandingkan dengan masing-masing

resistor itu sendiri. Dalam hal ini resistansi dan tegangan bersifat menjumlahkan tetapi nilai arus tetap sama seperti terlihat pada gambar 3.18



Gambar 3.18 Hubungan resistansi seri

Rangkaian resistansi seri juga dikatakan sebagai rangkaian Pembagi Tegangan dengan alasan tegangan pada resistor yang terhubung seri dapat dibagi secara proporsi terhadap nilai resistansi seperti pada gambar 3.19.



Gambar 3.19 Rangkaian dasar pembagi tegangan

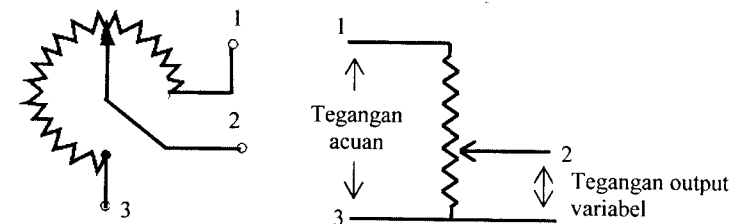
$$V_{\text{tot}} = R_{\text{ekuivalen}} I = \left(\sum_{j=1}^{j=n} R_j \right) I \quad (3.8)$$

Dari persamaan (3.7) dan (3.8)

$$\frac{V_1}{V_{\text{tot}}} = \frac{R_1}{R_{\text{ekuivalen}}} \text{ atau } V_1 = \frac{R_1}{R_{\text{ekuivalen}}} V_{\text{tot}} \quad (3.9)$$

Aplikasi untuk keadaan riil antara lain:

- Menggantikan posisi salah satu resistor tetap sebagai:
 - Resistor variable atau potensiometer lihat gambar 3.20
 - Sensor
 - Thermistor
 - LDR

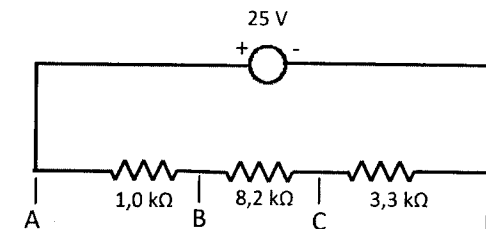


Gambar 3.20 Potensiometer

- Piranti masukan elektronis yang digunakan untuk mengubah besaran fisis menjadi sinyal listrik

Contoh soal 3.3

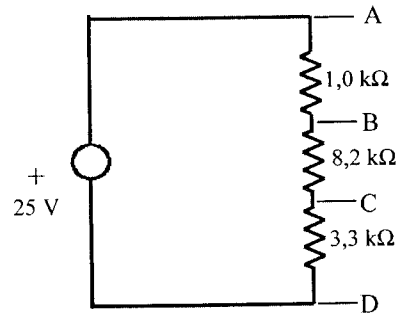
- 1) Dari rangkaian pada Gambar 3.21 hitung tegangan pada AB, BC dan BD.



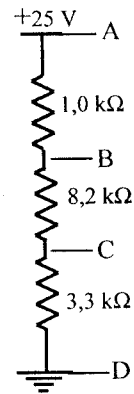
Gambar 3.21 Rangkaian untuk contoh soal no 1

Jawab:

Orientasi rangkaian dapat diubah untuk mempermudah gambaran penyelesaian sebagai terlihat pada gambar 3.22 dan dapat disederhanakan lagi untuk keperluan lain seperti pada gambar 3.23.



Gambar 3.22 Orientasi rangkaian dari gambar 3.19



Gambar 3.23 Penyederhanaan rangkaian dari gambar 3.20

$$R_{\text{ekuivalen}} = (1,0 + 8,2 + 3,3)\text{k}\Omega = 12,5 \text{ k}\Omega$$

$$V_{AB} = \frac{R_{AB}}{R_{\text{ekuivalen}}} V_{\text{tot}} = \frac{1}{12,5} 25 = 2 \text{ volt}$$

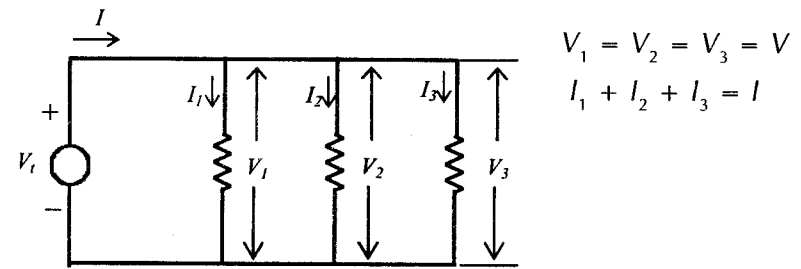
$$V_{BC} = \frac{R_{BC}}{R_{\text{ekuivalen}}} V_{\text{tot}} = \frac{8,2}{12,5} 25 = 16,4 \text{ volt}$$

$$V_{BD} = \frac{R_{BD}}{R_{\text{ekuivalen}}} V_{\text{tot}} = \frac{11,5}{12,5} 25 = 23 \text{ volt}$$

b. Hubungan Resistansi Paralel

Bila resistor dihubungkan secara paralel seperti gambar 3.24 akan menghasilkan nilai resistansi yang lebih kecil dibandingkan masing-masing resistor yang diparalel. Rangkaian resistansi paralel juga dikatakan sebagai rangkaian Pembagi Arus dengan alasan arus pada

resistor yang terhubung paralel dapat dibagi secara proporsi terhadap nilai resistansi.



Gambar 3.24 Hubungan resistor paralel

$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} = \frac{V}{R_{\text{ekuivalen}}} \quad (3.10)$$

$$V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{V}{R_{\text{ekuivalen}}} \quad (3.11)$$

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_{\text{ekuivalen}}} \quad (3.12)$$

Dari gambar 3.24 bila $G = \frac{1}{R}$ maka

$$G_1 + G_2 + G_3 = G_{\text{ekuivalen}} \quad (3.13)$$

$$VG_1 = I_1 \quad (3.14)$$

$$VG_{\text{ekuivalen}} = I \Rightarrow V = \frac{I}{G_{\text{ekuivalen}}} \text{ sehingga}$$

$$I_1 = \frac{G_1}{G_{\text{ekuivalen}}} I \quad (3.15)$$

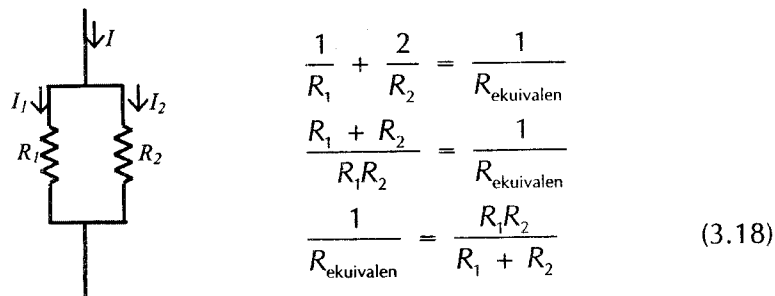
$$I_1 = \frac{R_{\text{ekuivalen}}}{R_1} I \quad (3.16)$$

Dengan cara yang sama maka untuk arus pada cabang ke n dapat dihitung dengan

$$I_n = \frac{G_n}{G_{\text{ekuivalen}}} I$$

$$I_n = \frac{R_n}{R_{\text{ekuivalen}}} I \quad (3.17)$$

Khusus untuk dua resistor paralel, nilai resistansi ekuivalen dapat dihitung berdasar gambar 3.25 sehingga akan diperoleh ,



Gambar 3.25 Hubungan dua resistor paralel

Untuk menghitung masing-masing arus dapat digunakan persamaan 3.15 dan 3.18 sehingga diperoleh hubungan sebagai berikut

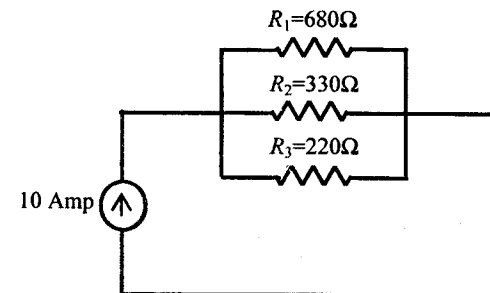
$$I_1 = \frac{G_1}{G_{\text{ekuivalen}}} I \Rightarrow I_1 = \frac{R_{\text{ekuivalen}}}{R_1} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \frac{1}{R_1}$$

dengan demikian $I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ (3.19)

dengan cara yang sama maka $I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

Contoh soal 3.4

- 1) Hitung nilai arus pada masing-masing resistor dari rangkaian pada gambar 3.26.



Gambar 3.26 Rangkaian untuk contoh soal no. 1

$$\frac{1}{R_{\text{ekuivalen}}} = \frac{1}{680} + \frac{1}{330} + \frac{1}{220}$$

$$R_{\text{ekuivalen}} = 111 \, \Omega$$

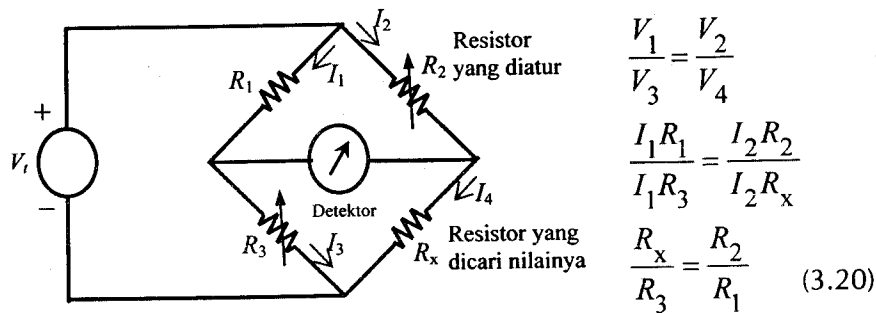
$$I_1 = \frac{R_{\text{ekuivalen}}}{R_1} I = \frac{111}{680} \cdot 10 \text{ Amp.} = 1,63 \text{ Amp.}$$

$$I_2 = \frac{R_{\text{ekuivalen}}}{R_2} I = \frac{111}{330} \cdot 10 \text{ Amp.} = 3,36 \text{ Amp.}$$

$$I_3 = \frac{R_{\text{ekuivalen}}}{R_3} I = \frac{111}{220} \cdot 10 \text{ Amp.} = 5,05 \text{ Amp.}$$

c. Jembatan Wheatstone

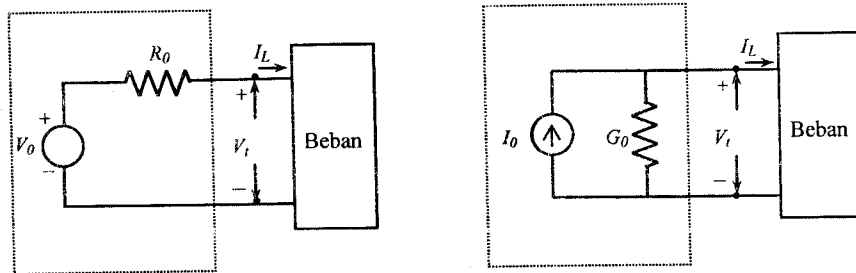
Rangkaian pada gambar 3.27 disebut rangkaian jembatan Wheatstone, digunakan untuk piranti pengukuran temperatur dengan memasang termistor sebagai R_x . Termistor sebagai sensor temperatur karena nilai resistansi termistor akan turun saat temperatur naik. Dengan kesetimbangan tegangan maka tegangan detektor terbaca = 0



Gambar 3.27 Rangkaian Jembatan Wheatstone

3.6 Konversi Sumber

Pada suatu saat akan sangat membantu mempunyai beberapa sumber tegangan atau sumber arus yang dapat saling ditransformasikan atau saling dipertukarkan. Hal ini dilakukan untuk mempermudah analisis rangkaian. Sumber tegangan yang terhubung seri dengan sebuah resistansi akan ekuivalen dengan sumber arus yang paralel dengan resistansi. Nilai konversi dapat dihitung sebagai berikut,



Gambar 3.28 Konversi sumber tegangan (a) ke sumber arus (b) atau sebaliknya.

Dari gambar 3.30 (a):

$$-V_0 + I_L R_0 + V_t = 0$$

$$I_L = \frac{V_0 - V_t}{R_0} = \frac{V_0}{R_0} - \frac{V_t}{R_0}$$

Dari gambar 3.30 (b)

$$I_L = I_0 - \frac{V_t}{R_0}$$

$$I_L = I_0 - G_0 V_t$$

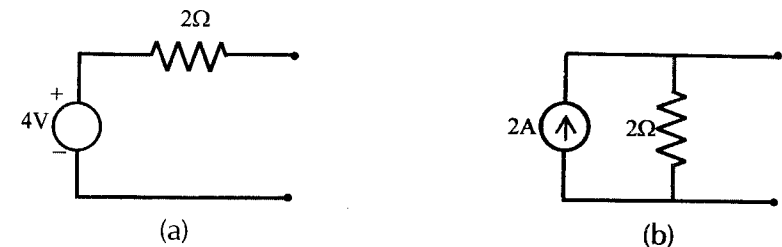
$$I_0 - G_0 V_t = \frac{V_0}{R_0} - \frac{V_t}{R_0}$$

Dengan demikian dapat disimpulkan $I_0 = \frac{V_0}{R_0}$ (3.21)

$$G_0 = \frac{1}{R_0} \quad (3.22)$$

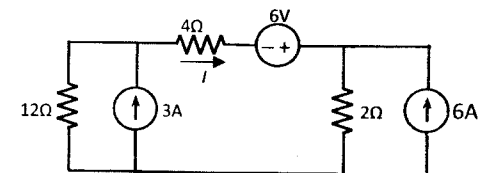
Contoh soal 3.5

- 1) Konversikan sumber tegangan 4 V yang terhubung seri dengan resistansi 2Ω menjadi sumber arus yang paralel dengan resistansi. Jawab: Dengan rangkaian pada gambar 3.29(a) dapat dikonversi ke rangkaian gambar 3.29(b)

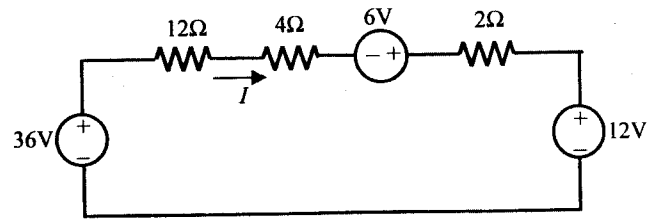


Gambar 3.29 Konversi sumber tegangan (a) ke sumber arus (b) atau sebaliknya

- 2) Dari rangkaian pada gambar 3.30 berapa nilai arus yang mengalir pada resistansi 4Ω ?



Gambar 3.30 Rangkaian untuk contoh soal no. 2

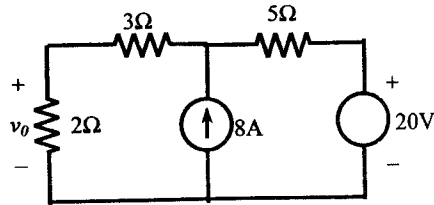


Gambar 3.31 Hasil transformasi untuk rangkaian gambar 3.30

Dengan demikian harga I dapat dihitung

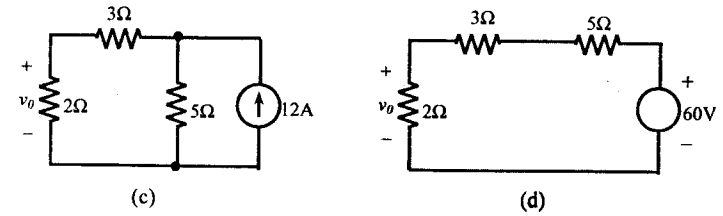
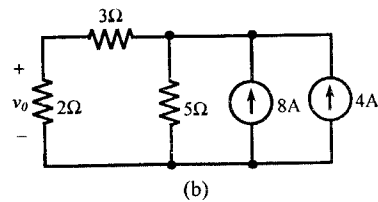
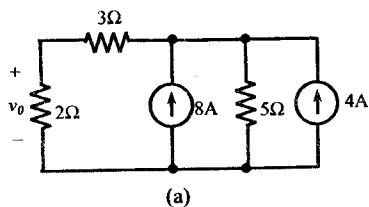
$$I_s = \frac{36 + 6 - 12}{12 + 4 + 2} = 1,67 \text{ Amp.}$$

3) Berapa harga tegangan v_0 untuk rangkaian pada gambar 3.32.



Gambar 3.32 Rangkaian untuk contoh soal no. 6

Jawab: Rangkaian pada gambar 3.32 dibuat transformasinya seperti pada gambar 3.33a) yang kemudian ke dua sumber dijadikan satu seperti gambar 3.33c).



Gambar 3.3 Hasil rangkaian dari transformasi

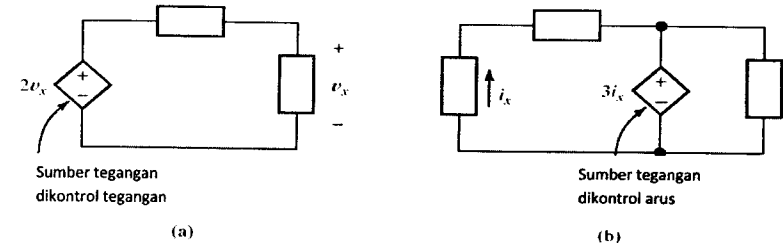
Rangkaian gambar 3.35c) ditransformasikan kembali menjadi gambar 3.35d) sehingga dapat dianalisis dengan persamaan edaran:

$$2I + 3I + 5I = 60 \Rightarrow I_s = \frac{60}{10} = 6 \text{ Amp.}$$

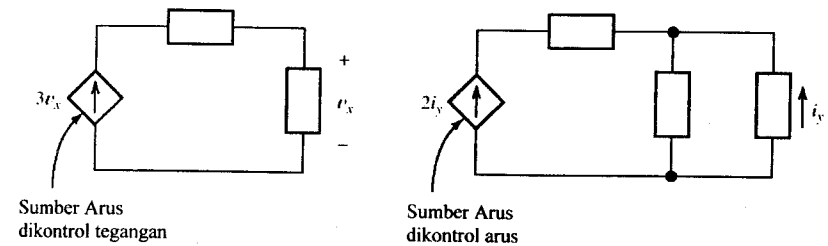
$$V_0 = 2 \times 6 = 12 \text{ Amp.}$$

3.7 Sumber Tak Bebas Atau Sumber Terkontrol

Sumber yang tergantung pada arus atau tegangan dari bagian lain dalam rangkaian disebut sumber tak bebas atau sumber terkontrol. Lihat gambar 3.34 dan 3.35.

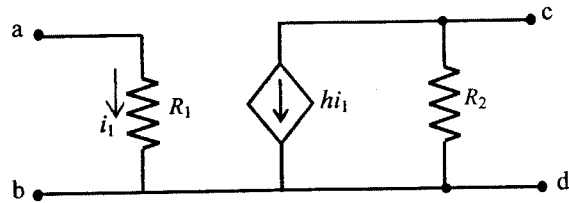


Gambar 3. 34 Sumber tegangan tak bebas

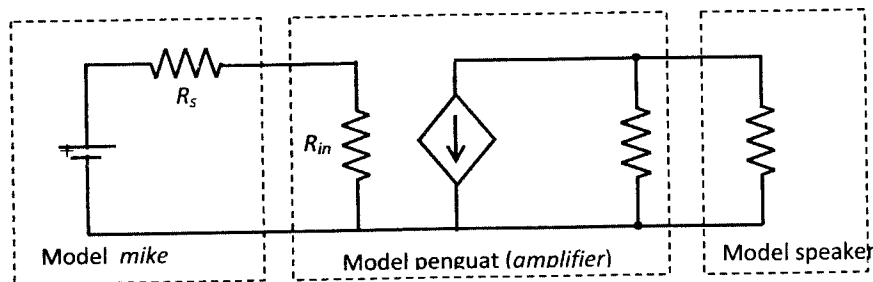


Gambar 3. 35 Sumber arus tak bebas

Penerapan sumber tak bebas dapat dijumpai pada model rangkaian untuk transistor seperti pada gambar 3.37 atau pada model dari sebuah sound system seperti gambar 3.38.



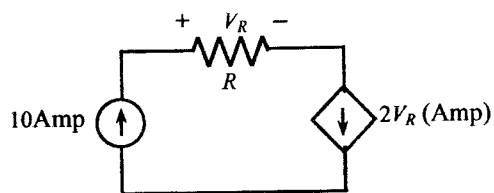
Gambar 3.36 Sumber arus dikontrol arus pada model rangkaian transistor



Gambar 3.37 Rangkaian untuk model sebuah sound system

Contoh soal 3.6

- 1) Berapa nilai R dari rangkaian pada gambar 3. 38?



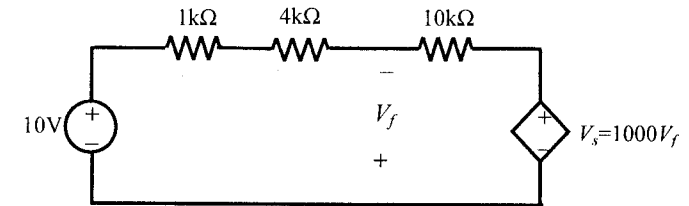
Gambar 3.38 Rangkaian untuk contoh soal no. 1

Jawab: $2 V_R = 10 \text{ Amp}$

$I = 10 \text{ Amp}$

$R = \frac{5}{15} = 0,5 \Omega$

- 2) Rangkaian pada gambar 3.39 adalah model penyederhanaan dari Op-amp untuk inverting amplifier. Hitung berapa nilai V_f



Gambar 3.39 Rangkaian untuk contoh soal no. 2

Jawab: Dengan persamaan edaran:

$$-10V + 1k\Omega I + 4k\Omega I + 10k\Omega I + 1000V_f = 0$$

Padahal $V_f = -10V + 1k\Omega I + 4k\Omega I \Rightarrow V_f = -10V + 5k\Omega I$

Sehingga $-10V + 15k\Omega I + 1000(-10V + 5k\Omega I) = 0$

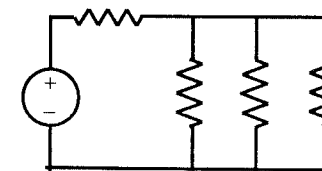
$$-10010V + 5015k\Omega I = 0$$

$$I = \frac{10010}{5152 \times 10^3} = 1,996 \text{ mA}$$

Jadi $V_f = -10V + 5k\Omega 1,996 \cdot 10^{-3} = -10 + 9,98 = -0,02 \text{ V}$

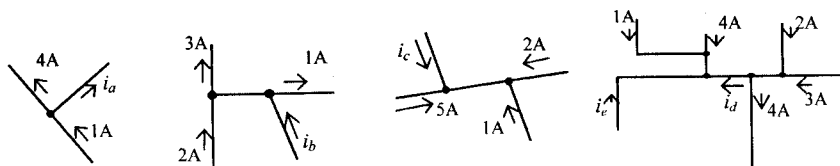
Latihan Soal:

1. Tetapkan ada berapa simpul dari untai listrik gambar 3.40 di bawah ini



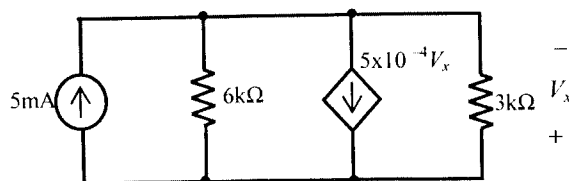
Gambar 3.40 Untai listrik untuk latihan soal 1

- 2) Dengan menggunakan simbol-simbol untuk rangkaian, gambarkan sebuah sumber tegangan 9V yang dihubungkan dengan resistor 10 Watts , dan tunjukkan kemana arah arus konvensional. Bagaimana memasang voltmeter dan ammeter agar nilai jatuh tegangan dan nilai arus yang mengalir pada resistor akan terukur. Berapa nilai yang terbaca pada voltmeter dan ammeter tersebut.
- 3) Berapa harga i_a , i_b , i_c dan i_d dari susunan-susunan pada gambar 3.41



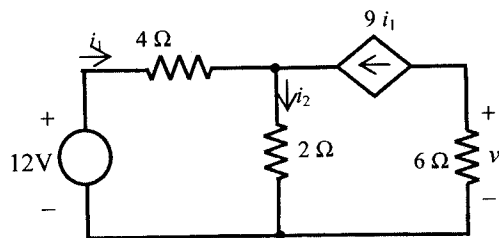
Gambar 3.41 Susunan simpul untuk latihan soal 3

- 4) Sebuah rangkaian linier untuk sinyal kecil sebuah amplifier transistor sebagai pada gambar 3.42. Berapa harga V_x ?



Gambar 3.42 Susunan simpul untuk latihan soal 4

- 5) Dari rangkaian gambar 3.43, hitung nilai v !



Gambar 3.43 Rangkaian untuk latihan soal no. 5

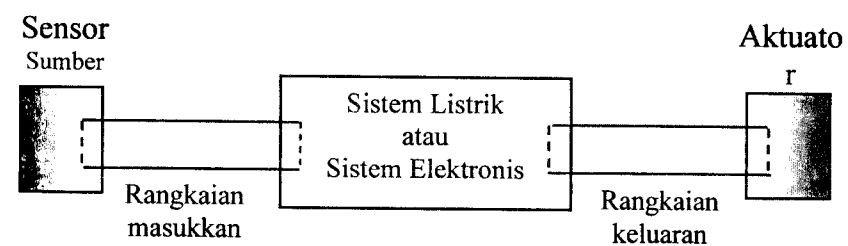
3.8 Daftar Pustaka

- Boylestad, Robert, *Introductory Circuit Analysis*, Prentice Hall, Inc. 1997
- Edminister, Joseph A., *Theory and Problem Of Electric Circuit in S.I. Unit*, New York: McGraw Hill, 1972.
- Floyd, Thomas, F., *Principles of Electric Circuit*, Prentice Hall, 2000.
- Hayt Jr., William H.; Kemmerly, Jack E., *Engineering Circuit Analysis*, McGraw-Hill, Inc., 1993.
- Johnson, David E., *Basic Electric Circuit Analysis*, Prentice Hall, Inc. 1995
- Mismail, Budiono, *Dasar Teknik Elektro*, Bayu Media Publishing 2006.
- Paul, C.R., *Introduction To Electrical Engineering*, McGraw-Hill, Inc., 1992.
- Rizzoni, Giorgio., *Principles and applications of Electrical Engineering*, Third edition, McGraw-Hill, 2000
- Ryder, John D., *Electrical and Electronic Engineering*, McGraw-Hill Book Company, 1967
- Smith, R. J. *Circuits, Devices and Systems*. New York: John Wiley and Sons Inc., 1972.

-oo0oo-

Pengenalan Sinyal

Pada sebuah sistem kelistrikan aliran energi memerlukan sebuah rangkaian dengan satu masukan berupa sumber dan satu keluaran berupa beban sebagaimana tergambar pada gambar 4.1. Dalam hal ini sensor sebagai sumber dan aktuator sebagai beban.



Gambar 4.1 Rangkaian sistem kontrol atau proses

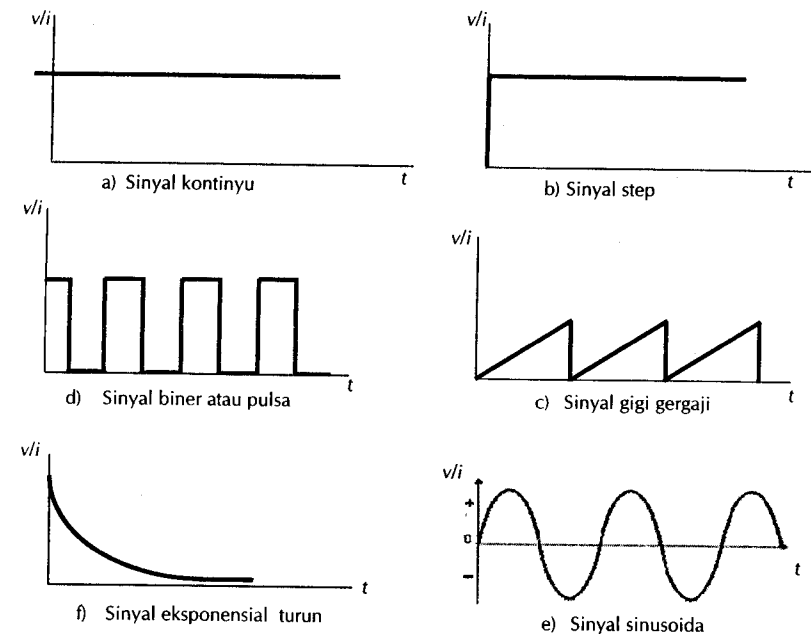
Sebagai masukan ke sensor adalah besaran-besaran fisis. Besaran-besaran fisis lebih mudah dianalisis bila dalam bentuk sinyal listrik. Bisa berbentuk sinyal kontinyu ataupun diskrit. Dengan demikian sinyal sebenarnya merupakan informasi yang dapat diproses melalui alat-alat elektronis. Besaran sinyal tergantung kandungan informasi yang dibawanya.

Sistem radio juga dapat dipahami sebagai efek dari sinyal. Sinyal adalah besaran yang berubah terhadap waktu, jarak, posisi, suhu, tekanan dan sebagainya. Sebagai contoh, berbagai variasi arus ataupun tegangan dalam sebuah rangkaian listrik, suara (tekanan gelombang yang berjalan di udara, cahaya atau gelombang radio (energi elektromagnet yang berjalan di udara bebas). Sinyal dapat berupa fungsi dari satu atau dua atau N variabel bebas. Ucapan adalah sinyal dengan satu dimensi sebagai fungsi waktu, citra adalah sinyal dengan dua dimensi sebagai fungsi ruang sedangkan video adalah sinyal 3 dimensi dengan fungsi ruang dan waktu.

Pembahasan tentang sinyal meliputi penghitungan harga rata-rata dan harga efektif sebuah sinyal untuk memudahkan penilaian besarnya energi yang ditransfer dari sebuah rangkaian. Pembahasan juga ditekankan pada bentuk sinyal sinusoida yang paling sering dijumpai untuk suplai energi pada berbagai peralatan sehari-hari.

4.1 Berbagai Jenis Sinyal

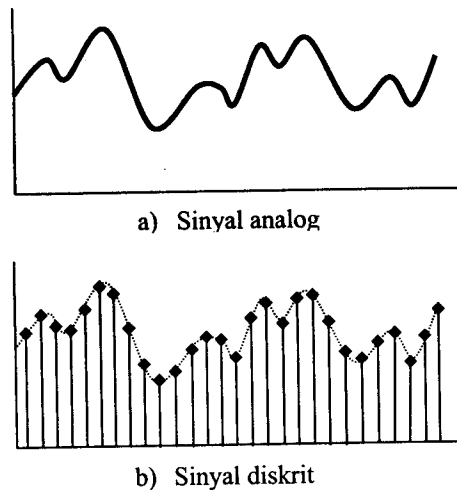
Sinyal yang kontinu untuk waktu dengan tegangan atau waktu dengan arus sering kali dinyatakan sebagai sinyal analog seperti pada gambar 4.2. Sinyal diskrit sering kali dinyatakan sebagai sinyal digital.



Gambar 4.2 Bentuk-bentuk Sinyal

Sinyal tegangan ataupun arus yang kontinu dibangkitkan oleh baterai atau accu, Sinyal ini biasa disebut sebagai sinyal dengan arus searah (*Direct Current* = DC). Sinyal step terjadi saat arus mengalir karena adanya sebuah switch terhubung sehingga tiba-tiba timbul tegangan pada sebuah resistansi. Arus yang mengalir berbentuk pulsa digambarkan oleh adanya switch dalam kondisi ON dan OFF, digunakan untuk menyuplai peralatan-peralatan berdasar sistem digital misal komputer. Aliran informasi pada komputer merupakan pulsa-pulsa yang pendek. Sinyal gigi gergaji merupakan tampilan dari batang-batang elektron yang bergerak pada layar monitor televisi. Sinyal ini naik secara linier terhadap waktu, dan langsung kembali ke nol serta berulang secara periodis. Arus berbentuk sinyal eksponensial turun adalah gambaran dari pelepasan energi yang tersimpan dalam kapasitor lewat sebuah ke resistor. Sinyal sinusoida atau kosinusoida adalah sinyal yang dibangkitkan saat kumparan diputar secara

konstan dalam medan magnet pada pembangkitan tenaga listrik atau generator. Sinyal ini biasa disebut dengan sinyal “**arus bolak balik**” (Alternating Current = AC) dan banyak dimanfaatkan sebagai suplai energi peralatan sehari-hari.



Gambar 4.3 Digitasi dari singa analog pada gambar a menjadi sinyal diskrit gambar b

Sinyal yang kontinu dapat dikonversikan menjadi sinyal diskrit setelah dilakukan proses digitasi, dipisahkan dengan interval-interval waktu tertentu, seperti terlihat pada gambar 4.3. Proses ini dilakukan oleh ADC atau dikenal dengan *Analog to Digital Converter*. Dan sebaliknya bila sinyal digital dikembalikan ke sinyal analog oleh DAC, *Digital to Analog Converter*. Kebanyakan sinyal digital hanya mempunyai dua nilai yang dinyatakan sebagai logika dan logika 0 untuk level yang lain.

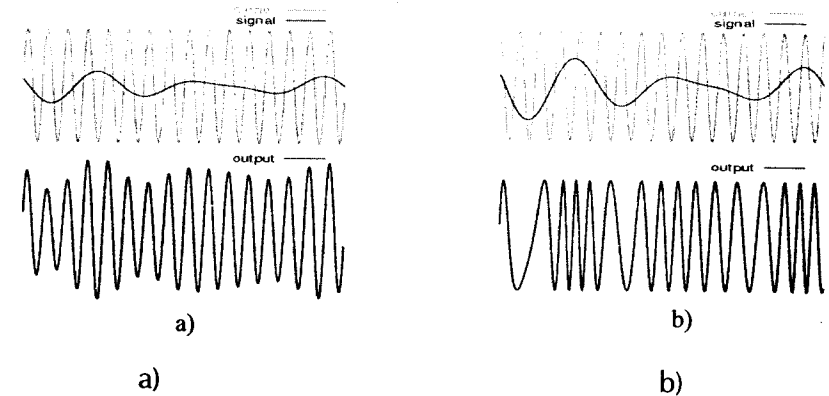
4.2 Modulasi

Hanya ada satu gelombang sinus pada frekuensi yang diberikan oleh karena itu agar informasi dapat dikirimkan dengan frekuensi

tertentu dilakukan modulasi. Modulasi adalah pengkodean informasi pada sebuah sinyal dengan menempelkan pada sinyal pembawa. Proses modulasi untuk kebutuhan saat pengiriman sinyal frekuensi tinggi melalui transceiver yang kemudian akan di demodulasi setelah diterima oleh receiver.

Ada dua jenis modulasi, pada gambar 4.4:

- Modulasi amplitudo, pada sinyal keluaran terjadi perubahan nilai amplitudo
- Modulasi frekuensi, pada sinyal keluaran terjadi perubahan nilai frekuensi



Gambar 4.4 a) Modulasi amplitudo b) Modulasi frekuensi

4.3 Persamaan Matematis Sebuah Sinyal

Perhatian khusus ditujukan untuk sinyal berbentuk eksponensial dan sinusoida, karena kedua gelombang ini mudah dibangkitkan dan mudah dianalisis dari bentuk diferensial dan integralnya, serta paling banyak dijumpai untuk keperluan sehari-hari.

a. Fungsi Eksponensial

Persamaan untuk gelombang eksponensial turun dari gambar 4.5 dituliskan dengan:

$$a(t) = Ae^{at} \quad (4.1)$$

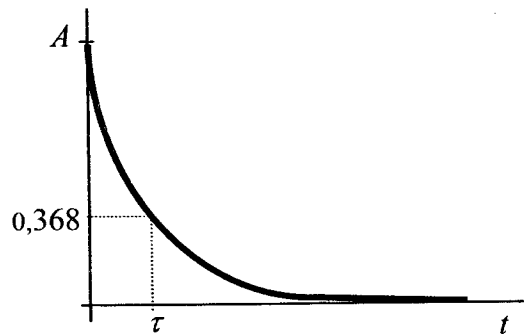
$a(t)$ = nilai sesaat

A = amplitudo atau harga maksimum

e = berdasar harga logaritma = 2,718...

τ = konstanta waktu

t = waktu yang ditempuh-detik



Gambar 4.5 Sinyal eksponensial

Sinyal berbentuk eksponensial turun terhadap waktu antara lain terlihat pada penurunan suhu tubuh saat berada di lingkungan yang dingin, kecepatan sudut roda sepeda yang diputar bebas, atau nilai arus saat pelepasan muatan kapasitor.

Dengan fungsi eksponensial akan mencapai nilai 0 saat t naik untuk waktu yang cukup jauh tanpa batas. Untuk itu dicari nilai waktu yang cukup meyakinkan dengan membuat harga eksponen = -1 . Atau $t = \tau$ = konstanta waktu.

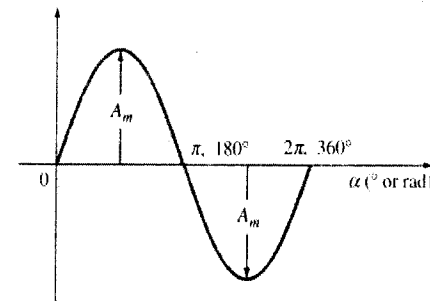
$$e^{-t/\tau} = e^{-1} = \frac{1}{e} = \frac{1}{2,718} = 0,368$$

Dengan kata lain setelah waktunya sama dengan konstanta waktu faktor eksponensial berkurang sekitar 37%.

b. Fungsi Sinusoida

Sinyal sinusoida termasuk dalam jenis sinyal periodis yang kontinu terhadap waktu $x(t)$ dengan $T > 0$, untuk semua t .

Untuk memudahkan penyelesaian analisis rangkaian dengan suplai daya berupa gelombang sinus perlu dipahami lebih dahulu persamaan matematis dari fungsi sinusoida seperti terlihat pada gambar 4.7. Bentuk persamaan sebagai berikut,



$$a(t) = A_m \sin \alpha \quad (4.2)$$

terlihat bahwa fungsi ini memotong sumbu α pada 0, π , 2π dan seterusnya dalam derajat atau radian.

Gambar 4.6 Grafik fungsi sinusoida

Apabila bentuk gelombang sinus bergeser ke kanan atau ke kiri dari 0° maka persamaan fungsi sinus menjadi:

$$a(t) = A_m \sin(\alpha \pm \theta) \quad (4.3)$$

dengan θ adalah sudut pergeseran dan disebut sudut fase

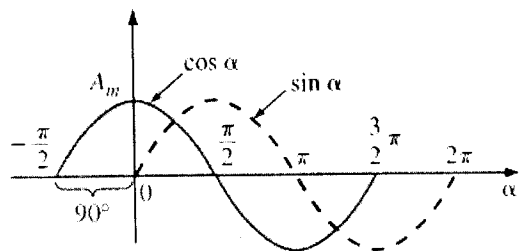
Bila gelombang sinus dengan bagian positif memotong sumbu mendatar sebelum 0° maka persamaan fungsi sinus menjadi: $a(t) = A_m \sin(\alpha + \theta)$, bila gelombang sinus pada bagian positif memotong sumbu mendatar sesudah 0° maka persamaan fungsi sinus menjadi: $a(t) = A_m \sin(\alpha - \theta)$.

Terlihat bahwa fungsi kosinus adalah fungsi sinus yang bergeser sebesar 90° . Kedua sinyal ini identik dan mempunyai periode yang sama 2π sebagaimana tergambar pada gambar 4.7

Sehingga hubungan antara fungsi sinus dan kosinus sebagai:

$$\cos \alpha = \sin(\alpha + 90^\circ) \text{ dan}$$

$$\sin \alpha = \cos(\alpha - 90^\circ) \quad (4.4)$$



Gambar 4.7 Grafik fungsi sinus dan kosinus

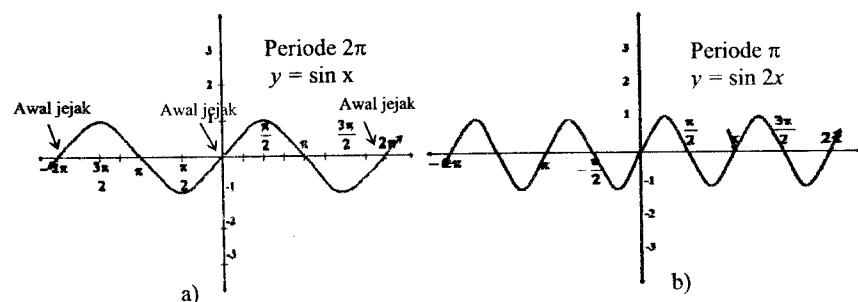
Dalam sebuah sistem harus menggunakan bentuk fungsi yang sama. Misal diketahui harga tegangan $v = 3\cos 3t$, dan nilai arus $i = -2\sin(3t + 10^\circ)$, maka nilai i dirubah ke ke fungsi kosinus

$$i = 2 \sin(3t + 180^\circ + 10^\circ)$$

$$i = 2 \cos(3t + 180^\circ + 10^\circ - 90^\circ) = 2 \cos(3t + 100^\circ)$$

c. Frekuensi

Frekuensi adalah banyaknya putaran dalam 1 detik. Gambar 4.8a dan 4.8b menunjukkan sinyal sinusoida yang berbeda periode sehingga membentuk persamaan sinusoida yang berbeda pula.



Gambar 4.8 Grafik fungsi sinus dengan periode berbeda

Untuk gambar 4.8a kumparan berputar 1 putaran dalam 1 detik sehingga $f = 1 \text{ Hz}$

$$T = 1 \text{ detik}$$

Untuk gambar 4.8b kumparan berputar 2 putaran dalam 1 detik sehingga $f = 2 \text{ Hz}$

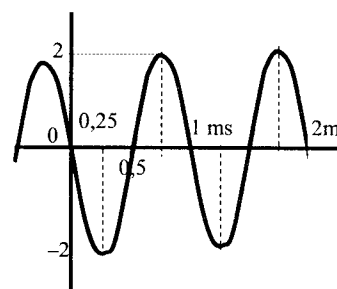
$$T = \frac{1}{2} \text{ detik}$$

Komponen-komponen untuk sebuah fungsi sinusoida ditentukan oleh periode, frekuensi, harga maksimum, harga puncak sebagai contoh pada gambar 4.9.

Contoh soal 4.1

- 1) Tetapkan nilai-nilai periode T , frekuensi f , kecepatan sudut ω , amplitudo A , harga puncak ke puncak dari fungsi sinusoida, harga sudut fase θ , dan persamaan fungsi sinus dari gambar 4.9.

Jawab:



$$T = (1,75 - 0,75) \text{ mdet} = 1 \text{ mdet.}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1 \cdot 10^{-3}} = 10^3 \text{ Hz} = 1 \text{ kHz}$$

$$\omega = 2\pi f = 2 \times 3.14 \times 10^3 = 7,28.10^3 \text{ rad/det}$$

$$A = 2$$

Gambar 4.9 Fungsi sinus untuk contoh soal no. 1

$$\text{Harga puncak ke puncak} = 2A = 4$$

$$\theta = 2\pi \times (-\frac{1}{2}) = -\pi \text{ atau}$$

$$\theta = -\omega \cdot t_0 = 2\pi \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = -\pi$$

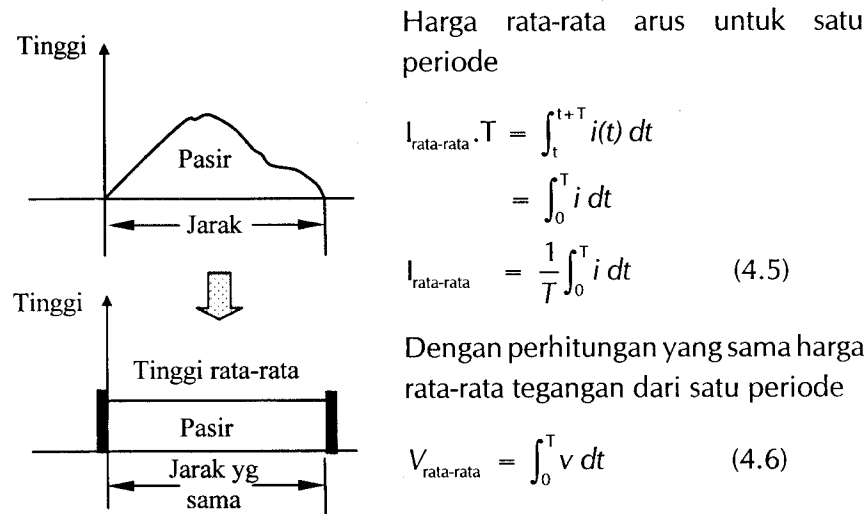
Maka persamaan fungsi sinus adalah $y = 2 \sin(7,28.10^3 t + \pi)$

4.4 Harga Rata-rata dan Harga Efektif/harga Rms

a. Harga Rata-rata

Sebuah fungsi periodis dapat dihitung nilai rata-ratanya untuk satu periode dengan mencari integral dari waktu t sampai $t + T$.

Untuk memahami harga rata-rata sebuah sinyal periodis yang berubah terhadap waktu dengan cara membuat analogi pada harga rata-rata ketinggian suatu timbunan pasir. Tinggi rata-rata gundukan pasir adalah tinggi pasir yang dibuat mendatar dengan membuat dinding pembatas pada jarak yang dipertahankan sama dengan jarak dari timbunan pasir seperti pada gambar 4.10.



Gambar 4.10 Cara mengukur tinggi rata-rata gundukan pasir

Untuk fungsi sinus/kosinus pada satu periode harga rata-ratanya adalah nol. Maka harga rata-rata untuk fungsi sinus/kosinus diambil $\frac{1}{2}$ periode saja.

$$I_{\text{rata-rata untuk } \frac{1}{2} \text{ periode}} = \frac{1}{\frac{1}{2}T} \int_{\frac{1}{4}}^{\frac{3}{4}} I_m \cos \omega t dt$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{2}T} \int_{\frac{1}{4}}^{\frac{3}{4}} I_m \cos \frac{2\pi t}{T} dt$$

$$= \frac{2I_m}{T} \left(\frac{T}{2\pi} \right) \sin \frac{2\pi t}{T} \Big|_{\frac{1}{4}}^{\frac{3}{4}}$$

Jadi harga rata-rata arus dari sebuah fungsi sinus/kosinus untuk setengah periode adalah,

$$I_{\text{rata-rata untuk } \frac{1}{2} \text{ periode}} = \frac{I_m}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi \cdot \frac{3}{4}}{T} - \sin \frac{2\pi \cdot \frac{1}{4}}{T} \right)$$

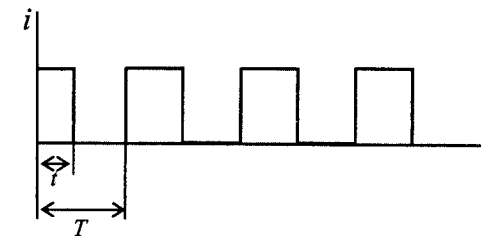
$$= \frac{2I_m}{\pi}$$

$$I_{\text{rata-rata untuk } \frac{1}{2} \text{ periode}} = 0,607 I_m \quad (4.7)$$

Faktor pengali 0,607 hanya berlaku untuk fungsi sinus/kosinus saja, untuk fungsi-fungsi yang lain dihitung dengan cara integrasi.

Contoh Soal 4.2

- 1) Hitung harga rata-rata untuk arus berbentuk kotak seperti pada gambar 4.11 bila $t = 2$ mdet dan $T = 5$ mdet



Gambar 4.11 Diagram kotak untuk contoh soal no. 1

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{1}{5} \int_0^2 6 dt$$

$$= \frac{1}{5} 6 \Big|_0^2$$

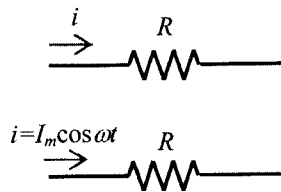
$$= \frac{1}{5} (6 \cdot 2 - 6 \cdot 0) = \frac{1}{5} \cdot 12$$

$$= 2,4 \text{ Volt}$$

b. Harga Efektif Atau Harga RMS

Seperti telah dijelaskan di atas bahwa harga rata-rata arus bolak balik berupa fungsi sinusoida untuk seluruh siklus = 0, sehingga bagaimana besaran bolak balik sinusoida akan menyuplai daya? Pada kenyataannya arus akan selalu mensuplai daya dari bagian positif maupun negatifnya pada setiap saat, sehingga daya total akan sama dengan dua kalinya yakni jumlah daya dari positif dan sisi negatif. Untuk itu dibuat suatu harga ekuivalen yang disebut "harga efektif atau harga RMS (Root Mean Square)"

Harga efektif atau harga RMS (Root Mean Square) adalah harga ekuivalen atas harga daya rata-rata dari suatu periode T sebuah arus bolak balik melalui sebuah resistor pada rangkaian AC dengan harga daya dari arus searah yang melalui resistor yang sama pada rangkaian DC.



Gambar 4.12 Resistansi
dilalui arus DC dan arus AC

Diperhitungkan dengan analisis sebagai berikut, lihat gambar 4.12:

Bila resistor dilalui arus DC energi yang diserap adalah:

$$P_{rata} T = W$$

$$= \int_t^{t+T} p(t) dt$$

$$P_{rata} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt$$

Bila resistor dilalui arus AC maka daya yang diserap adalah: $p = i^2 R$, dan ekuivalen

$$P_{rata} = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 R dt = I_{ef}^2 R$$

dengan daya pada DC ($= I_{ef}^2 R$) maka $I_{ef} = I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$

Khusus untuk fungsi sinus dengan $i = I_m \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$

maka

$$I_{RMS}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T I_{RMS}^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt$$

Bila $\cos^2 \omega t = \frac{1}{2} (1 + \cos 2\omega t)$, maka

$$I_{RMS}^2 = \frac{1}{T} I_{RMS}^2 \int_0^T \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos\left(\frac{4\pi}{T}t\right) \right\} dt$$

harga rata-rata $\cos = \cos\left(\frac{4\pi}{T}t\right) = 0$

maka

$$I_{RMS}^2 = \frac{I_m^2}{2}$$

Karena $I_{eff} = I_{RMS}$:

$$I_{ef} = I_{RMS} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m \quad (4.8)$$

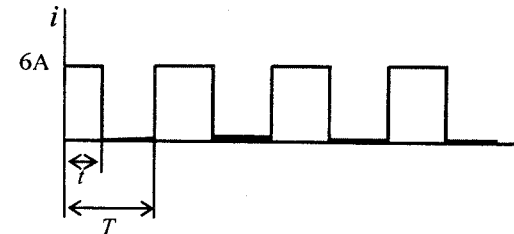
Dengan cara yang sama harga tegangan efektif juga dapat ditentukan dengan harga sebagai berikut.

$$V_{efektif} = 0,707 V_m$$

$$V_m = \sqrt{2} V_{ef} \quad (4.9)$$

Contoh Soal 4.3

- 1) Hitung harga efektif untuk arus berbentuk kotak seperti pada gambar 4.13 bila $t = 2$ mdet!



Gambar 4.13 Diagram kotak untuk contoh soal 1

$$\begin{aligned}
 I_{RMS} &= \frac{1}{5} \int_0^2 6 dt \\
 &= \frac{1}{5} 6 \Big|_0^2 \\
 &= \frac{1}{5} (36.2 - 36.0) = \frac{1}{5} . 72 \\
 &= 14,4 \text{ Volt}
 \end{aligned}$$

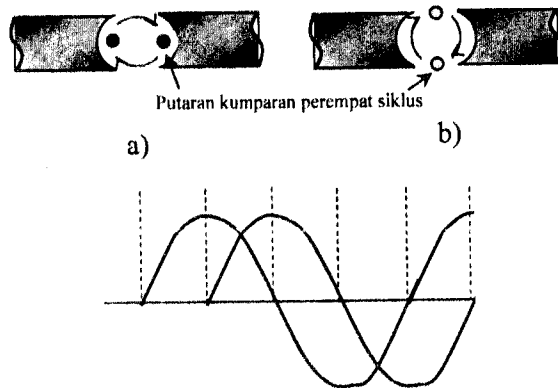
- 4) Pada sebuah voltmeter saat dihubungkan kesebuah sumber tegangan bolak balik terbaca angka 80V. Berapa harga maksimum tegangan bolak-balik tersebut?

Jawab: $V_{RMS} = 80V$

$$V_{maks} = \sqrt{2} \cdot 80 = 113V$$

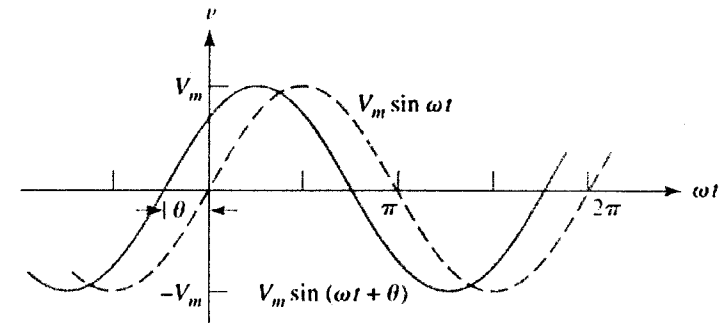
4.5 Sinyal Arus Bolak-balik (*Alternating Current*)

Gelombang sinus yang dibangkitkan oleh pembangkit tenaga listrik akibat putaran kumparan untuk beberapa posisi kumparan terlihat pada gambar 4.14 dikenal sebagai sinyal bolak balik, untuk tegangan maupun arus.



Gambar 4.14 Fungsi sinus yang dihasilkan oleh putaran kumparan
a) Posisi kumparan sejajar medan magnet
b) Posisi awal kumparan bergeser seperempat siklus

Nilai α adalah kecepatan putar ωt dan seperti telah dijelaskan pada persamaan 4.3 bila bergeser fase θ maka grafik fungsi sinus seperti pada gambar 4.15.



Gambar 4.15 Tegangan sinusoida dengan pergeseran fase

Secara umum persamaan fungsi sinus dituliskan sebagai:

$$v(t) = V_m \sin(\omega t + \theta) \quad (4.10)$$

$v(t)$ = nilai tegangan sesaat

V_m = amplitudo tegangan atau tegangan maksimum–Volt

ω = kecepatan putar – radian/detik = $2\pi f$

f = frekuensi, banyaknya putaran dalam satu detik (= cycles per second)–cps atau Hertz (Hz)

t = waktu yang ditempuh–detik

T = periode = $1/f$

θ = sudut fase

Hubungan antara ω dengan α , f dan T

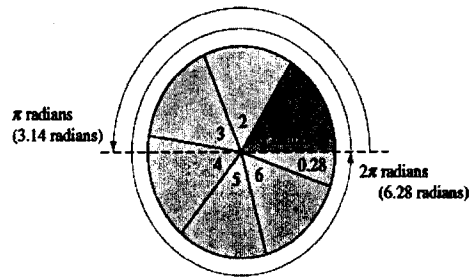
$$\text{Kecepatan sudut} = \frac{\text{jarak (derajat atau radian)}}{\text{waktu (detik)}}$$

$$\omega = \frac{\alpha}{t} \quad (4.11)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (4.12)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (4.13)$$

Kumparan generator berputar untuk satu putaran penuh atau 2π radian, lihat gambar 4.16 Hubungan antara derajat dan radian adalah:

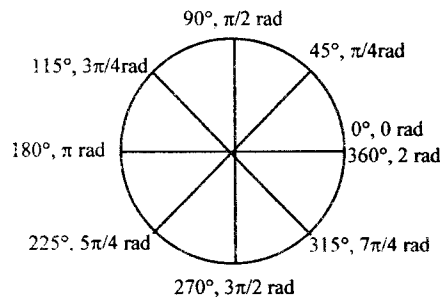


Gambar 4.16 Hubungan antara derajat dan radian

$$\text{Radians} = \left(\frac{\pi \text{ rad}}{180^\circ} \right) \times (\text{derajat}) \quad (4.14)$$

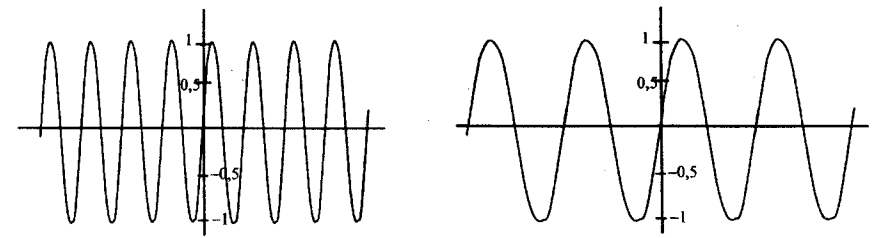
$$\text{Derajat} = \left(\frac{180^\circ}{\pi \text{ rad}} \right) \times (\text{radian}) \quad (4.15)$$

$$1 \text{ radian} = 57,3^\circ$$



Gambar 4.17 merupakan pengukuran derajat terhadap nilai radian.

Pada kenyataannya sebuah sistem dapat bekerja pada frekuensi yang berbeda, tergantung pada kondisi keperluannya. Untuk fungsi sinus dengan frekuensi yang berbeda seperti terlihat pada gambar 4.18.



Gambar 4.18 Fungsi sinusoida untuk frekuensi yang berbeda

a) Frekuensi tinggi

b) Frekuensi rendah

Gelombang akan mencapai tegangan maksimum saat $(\omega t_{maks} + \alpha) = 0$ sehingga

$$\alpha = -\omega t$$

$$t_{maks} = -\frac{\alpha}{\omega}$$

Contoh soal 4.4

- 1) Sebuah tegangan sinusoda dengan frekuensi 60 Hz seperti pada gambar 4.17 mencapai maksimum pada 20 Volt pada $t = 2 \text{ mdet}$. Tuliskan persamaannya.

Jawab: $V_m = 20 \text{ V}.$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi 60 = 377 \text{ rad/det}$$

$$\text{Mencapai maksimum pada } (\omega t - \alpha) = 0$$

$$\alpha = -377 \times 2 \cdot 10^{-3} \text{ rad} = -43,2^\circ$$

$$\text{Persamaan tegangan: } v_m = 20 \cos (377t - 43,2^\circ)$$

- 2) Diketahui sebuah tegangan dengan persamaan $v_m = 150 \sin (500t - 30^\circ)$. Hitung nilai tegangan pada $t = 2,09 \text{ mdet}$.

Jawab: saat $t = 2,09 \text{ mdet}$ maka

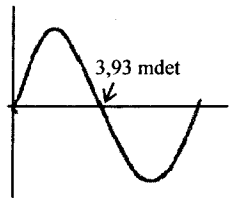
$$V = 150 \sin (500 \times 2,09 \times 10^{-3} \text{ rad} - 30^\circ).$$

$$= 150 \sin (59,9^\circ - 30^\circ) = 150 \sin 29,9^\circ$$

$$V = 74,7 \text{ Volt}$$

- 3) Sebuah gelombang sinus melewati nol pada $t = 0$ dan sesudah itu setiap 3,93 mdet. Pada $t = 3,12$ mdet nilai tegangan 30,0 Volt. Hitung kecepatan sudut ω , frekuensi f , periode T dan tegangan maksimumnya.

Jawab: Lihat gambar 4.19 $T = 2 \times 3,93 \cdot 10^{-3} = 7,86$ mdet



Gambar 4.19

Gelombang sinus untuk contoh soal no. 1

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{7,86 \cdot 10^{-3}} = 127,2 \text{ Hz}$$

$$\omega = 2\pi f = 799 \text{ radian/det}$$

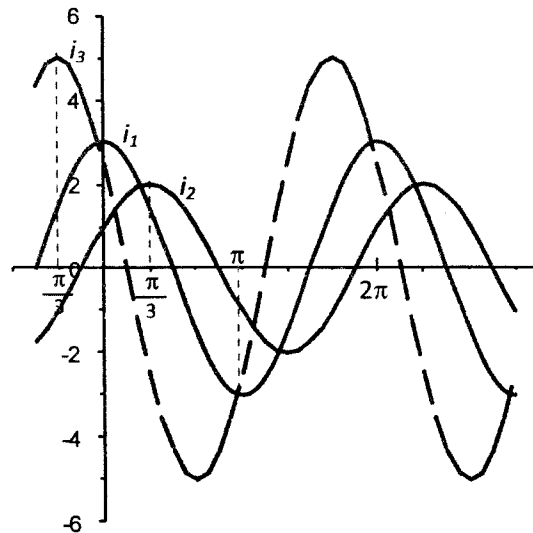
$$v = V_m \sin(\omega t + \alpha)$$

$$30 = V_{maks} \sin\left(799 \frac{180^\circ}{\pi}\right) = V_{maks} \sin 67,39^\circ$$

$$V_{maks} = 32,5 \text{ Volt}$$

a. Beda Fase

Berdasar kenyataan adanya pergeseran fase untuk dua atau lebih fungsi sinusoida maka dikatakan terjadi beda fase diantara masing-masing fungsi sinus seperti pada gambar 4.20. Masing-masing fungsi dapat dituliskan persamaannya:



Gambar 4.20 Fungsi sinus dengan berbagai sudut fase

$$i_1 = 3 \cos \omega t$$

$$i_2 = 2 \cos(\omega t - \pi/3) = 2 \cos(\omega t - 60^\circ)$$

$$i_3 = 5 \cos(\omega t + \pi/3) = 5 \cos(\omega t + 60^\circ)$$

Dengan demikian sudut fase masing-masing fungsi adalah:

$$\theta_1 = 0^\circ$$

$$\theta_2 = -60^\circ$$

$$\theta_3 = +60^\circ$$

Dari gambar 4.20 antara dua buah fungsi arus dapat dianalisis sebagai berikut:

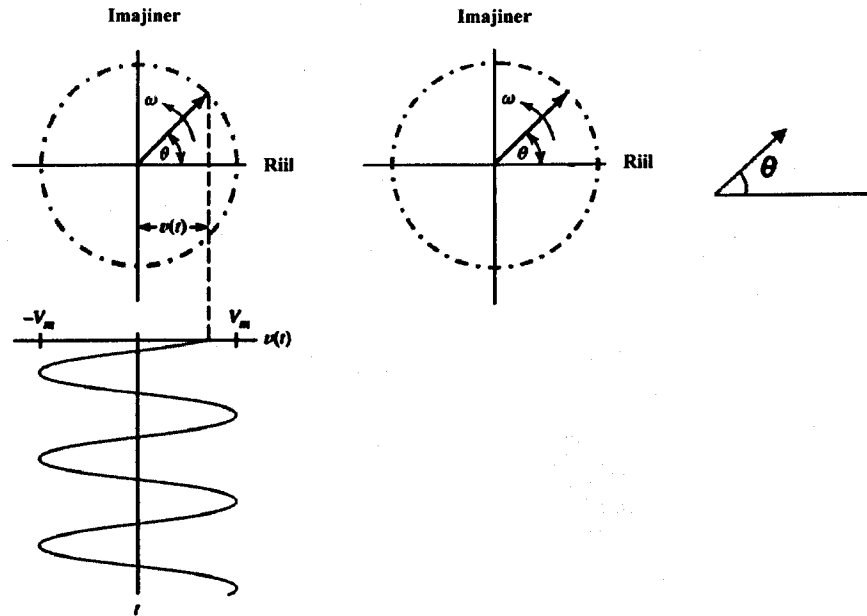
- i_1 dikatakan mendahului (*leading*) terhadap i_2 sebesar $60^\circ (= \theta_1 - \theta_2)$
- i_2 dikatakan tertinggal (*lagging*) terhadap i_3 sebesar $-120^\circ (= \theta_2 - \theta_3)$
- i_3 dikatakan mendahului (*leading*) terhadap i_1 sebesar $60^\circ (= \theta_3 - \theta_1)$
- i_3 dikatakan mendahului (*leading*) terhadap i_2 sebesar $120^\circ (= \theta_3 - \theta_2)$

4.6 Fasor

Untuk rangkaian dengan banyak elemen yang lebih dari satu, analisis rangkaian diterapkan untuk memperoleh parameter rangkaian (tegangan, arus, daya dan sebagainya) dalam edaran yang berbeda. Ada beberapa metode untuk penyelesaian analisis rangkaian. Dikenal ada dua metode, dengan metode kawasan waktu (*Time Domain Methode*) dan metode kawasan frekuensi atau metode Fasor (*Frequency Domain Methode or Phasor Methode*).

Metode Kawasan Waktu dapat diaplikasikan baik untuk analisis rangkaian pada kondisi *transient* maupun kondisi *steady*, sangat bermanfaat untuk kondisi transien, tetapi sulit karena kadang memerlukan penyelesaian dengan integrasi dan diferensiasi.

Metode fasor hanya untuk analisis rangkaian pada kondisi *steady*, merupakan metode yang mudah, dengan menggambarkan fungsi sinus dalam besaran dan sudut fase. Penyelesaian diferensiasi/integrasi digantikan dengan perkalian dan penjumlahan.



Gambar 2.1 Representasi fungsi sinus dalam bentuk rotasi kumparan

Fasor adalah bilangan kompleks dengan besar dan sudut fase. Besaran fasor adalah representasi dari besaran sinusoida dan sudut fase fasor adalah representasi sudut sinusoida. Sehingga untuk sebuah fungsi dalam kawasan waktu: $v_1(t) = V_1 \cos(\omega t + \theta_1)$

dapat gantikan dalam bentuk fasor: $V_1 = V_1 \angle \theta_1$

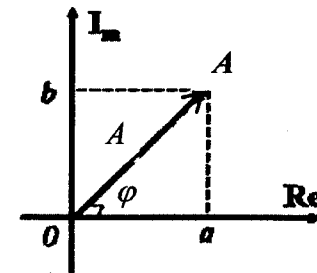
Sebuah fungsi sinus yang dibangkitkan oleh adanya kumparan dalam medan magnet dapat direpresentasikan dengan rotasi satu kumparan dengan arah melawan jarum jam. Seperti pada gambar 4.21.

Fasor dituliskan dengan huruf tebal, bila hanya ditulis manual maka dengan tanda ^, sedang huruf tipis adalah besarannya. Ada

bermacam persamaan untuk menggambarkan fasor sesuai dengan tabel 4.1. Bentuk rectangular, polar dan eksponensial masing-masing dapat saling ditransformasikan berdasar gambar 4.23.

Tabel 4.1 Berbagai bentuk Fasor

Nama	Bentuk persamaan
rektangular,	$A = a + jb$
polar	$A = A \angle \varphi$
eksponensial.	$A = A e^{j\varphi}$



$$A = a + jb$$

$$a = \text{harga riil dari } A = A \cos \varphi$$

$$b = \text{harga imajiner } A = A \sin \varphi$$

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{b}{a}$$

Gambar 4.22
Representasi Fasor

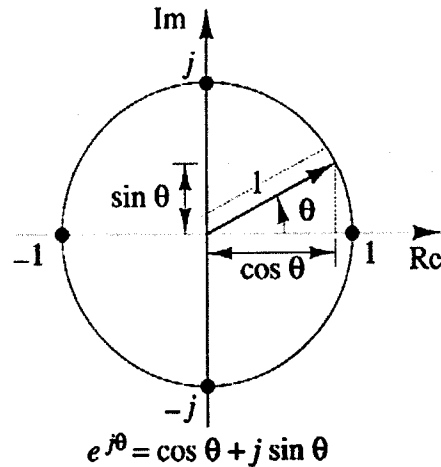
Bentuk eksponensial mengikuti persamaan Euler, yang penjabarannya berdasar pada gambar 4. 22 berdasar pada sebuah lingkaran dengan jari-jari 1 satuan.

Dengan demikian nilai Fasor A dapat dituliskan dalam beberapa bentuk sesuai tabel 4.1 dan berbagai harga j dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Harga Fasor A dan nilai j

A	$= A (\cos \varphi + j \sin \varphi)$
A	$= A e^{j\varphi}$
A	$= A \angle \varphi$
A	$= a + jb$

j	$= 1\angle 90^\circ$
$j \cdot j$	$= -1$
$-j$	$= \frac{1}{j}$



Gambar 4.23 Perhitungan untuk fasor

Contoh soal 4.5

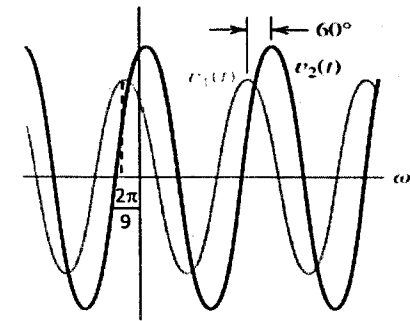
- 1) Tuliskan bentuk fasor dari fungsi $i = 5 \cos(100t + 30^\circ)$

Jawab: $I = 5 \angle 30^\circ$

- 2) Tuliskan bentuk persamaan dalam fungsi waktu untuk $V = 24 \angle 125^\circ$

Jawab: $v(t) = 24 \cos(\omega t + 125^\circ)$

- 3) Tuliskan persamaan dari grafik fungsi waktu pada gambar 4.24, gambar diagram fasornya dan berapa beda fase antara kedua tegangan, dan bagaimana sifatnya.



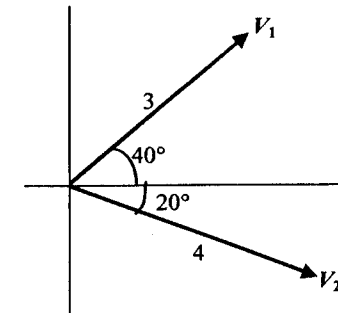
Gambar 4.24 Grafik fungsi waktu untuk contoh soal no. 3

Jawab: $v_1 = 3 \cos(\omega t + 40^\circ)$ dalam bentuk fasor:

$v_2 = 4 \cos(\omega t - 20^\circ)$ dalam bentuk fasor:

Terjadi beda fase sebesar $\theta_1 - \theta_2 = 40^\circ - (-20^\circ) = 60^\circ$

Untuk diagram fasor lihat gambar 4.25!



Gambar 4.25 Diagram fasor untuk contoh soal no. 3

Dikatakan bahwa v_1 mendahului (*leading*) terhadap v_2 sebesar 60°

- 4) Ubah fasor-fasor ini ke bentuk-bentuk fasor yang lain: a) $A = 3 + j5$; b) $B = 4 \angle 215^\circ$

Jawab: a) $A = 3 + j5$

$$A = \sqrt{3^2 + 5^2} = 5,83$$

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{5}{3} = 59,04^\circ$$

$$A = 5,83 \angle 59,04^\circ = 5,83e^{j59,04^\circ}$$

$$b) B = 4 \angle 225^\circ$$

$$\cos 215^\circ = -0,82$$

$$\sin 215^\circ = -0,57$$

$$B = 4(-0,82 - j0,57) = -3,28 - j2,28$$

Untuk memudahkan mengingat bentuk fasor berdasar letak kwadran lihat gambar 4.26

Kwadran II: $90^\circ \sim 180^\circ$ $a - jb$	Kwadran I: $0^\circ \sim 90^\circ$ $a + jb$
Kwadran III: $180^\circ \sim 270^\circ$ $-a - jb$	Kwadran IV: $270^\circ \sim 360^\circ$ $-a + jb$

Gambar 4.26 Bentuk fasor terhadap posisi kwadran

4.7 Aljabar Fasor

Model perhitungan untuk aljabar fasor berbeda dengan perhitungan aljabar biasa karena fasor mempunyai besar dan arah.

Misal diketahui dua bilangan fasor yakni: $A = a_1 + ja_2 = A \angle \alpha$ dan

$$B = b_1 + jb_2 = B \angle \beta$$

a. Penjumlahan

Untuk penjumlahan paling tepat menggunakan bentuk rektanguler.

Diperoleh

$$C = A + B = a_1 + ja_2 + b_1 + jb_2 = (a_1 + b_1) + j(a_2 + b_2) = c_1 + jc_2$$

$$c_1 = (a_1 + b_1)$$

$$c_2 = (a_2 + b_2)$$

$$C = \sqrt{c_1^2 + c_2^2}$$

$$\chi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{c_2}{c_1}$$

Contoh soal 4.6

1) Bila diketahui dua buah fasor $A = 3 + j4$ dan $B = 2 + j3$. Hitung fasor $C = A + B$

$$\text{Jawab: } C = 3 + j4 + 2 + j3 = 5 + j7 = 8,6 \angle 54,46^\circ$$

b. Pengurangan

Untuk pengurangan paling tepat menggunakan bentuk rektanguler.

$$\text{Diperoleh } D = A - B = a_1 + ja_2 - (b_1 + jb_2) = (a_1 - b_1) + j(a_2 - b_2) = d_1 + jd_2$$

$$d_1 = (a_1 - b_1)$$

$$d_2 = (a_2 - b_2)$$

$$D = \sqrt{d_1^2 + d_2^2}$$

$$\delta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{d_2}{d_1}$$

Contoh soal 4.7

- 1) Bila diketahui dua buah fasor $A = 3 + j4$ dan $B = 2 + j3$. Hitung fasor $D = A - B$

Jawab: $D = 3 + j4 - 2 - j3 = 1 + j1 = 1\angle 45^\circ$

c. Perkalian

Untuk perkalian lebih mudah menggunakan bentuk polar atau eksponensial walaupun dapat juga dengan bentuk rektanguler.

Diperoleh $E = A \cdot B = (a_1 + ja_2)(b_1 + jb_2) = a_1 \cdot b_1 + ja_1 \cdot b_2 + ja_2 \cdot b_1 - a_2 \cdot b_2 = e_1 + je_2$

$$e_1 = (a_1 \cdot b_1 - a_2 \cdot b_2)$$

$$e_2 = (a_1 \cdot b_2 + a_2 \cdot b_1)$$

$$D = \sqrt{e_1^2 + e_2^2}$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{e_2}{e_1}$$

Cara lain dengan bentuk polar

$$E = A \cdot B = A\angle\alpha \cdot B\angle\beta = AB\angle(\alpha + \beta)$$

Contoh soal 4.8

- 1) Bila diketahui dua buah fasor $A = 3 + j4 = 5\angle 53,3^\circ$ dan $B = 2 + j3 = 3,61\angle 56,31^\circ$. Hitung fasor $E = A \cdot B$

Jawab: $E = A \cdot B = (3 + j4)(2 + j3) = 6 + j9 + j8 - 12 = -6 + j17$

$$e_1 = -6$$

$$e_2 = j17$$

$$E = \sqrt{(-6)^2 + 17^2} = 18,03$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{17}{(-6)} = (180 - 70,56) = 109,46$$

atau

$$E = A \cdot B = (5\angle 53,13^\circ)(3,61\angle 56,31^\circ) = 18,05\angle(53,3 + 56,31)^\circ = 18,05\angle 109,44^\circ$$

d. Pembagian

Untuk pembagian hanya ada satu cara yakni menggunakan bentuk polar atau eksponensial.

$$\text{Diperoleh } F = \frac{A}{B} = \frac{A\angle\alpha}{B\angle\beta} = \frac{A}{B}\angle(\alpha - \beta)$$

Contoh soal

- 1) Bila diketahui dua buah fasor $A = 3 + j4$ dan $B = 2 + j3$. Hitung fasor

Jawab:

$$F = \frac{A}{B} = \frac{5\angle 53,3^\circ}{3,61\angle 56,31^\circ} = 1,39\angle(53,3 - 56,31) = 1,39\angle -3^\circ$$

4.8 Daftar Pustaka

- Floyd, Thomas, F., *Principles of Electric Circuit*, Prentice Hall, 2000.
Hayt Jr., William H.; Kemmerly, Jack E., *Engineering Circuit Analysis*, McGraw-Hill, Inc., 1993.
Johnson, David E., *Basic Electric Circuit Analysis*, Prentice Hall, Inc. 1995
Paul, C.R., *Introduction To Electrical Engineering*, McGraw-Hill, Inc., 1992.
Rizzoni, Giorgio., *Principles and applications of Electrical Engineering*, Third edition, McGraw-Hill, 2000

Ryder, John D., *Electrical and Electronic Engineering*, McGraw-Hill Book Company, 1967

Smith, R. J. *Circuits, Devices and Systems*. New York: John Wiley and Sons Inc., 1972.

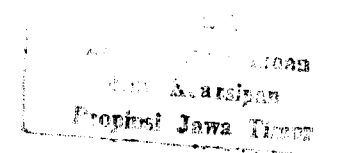
-oo0oo-

BAB V

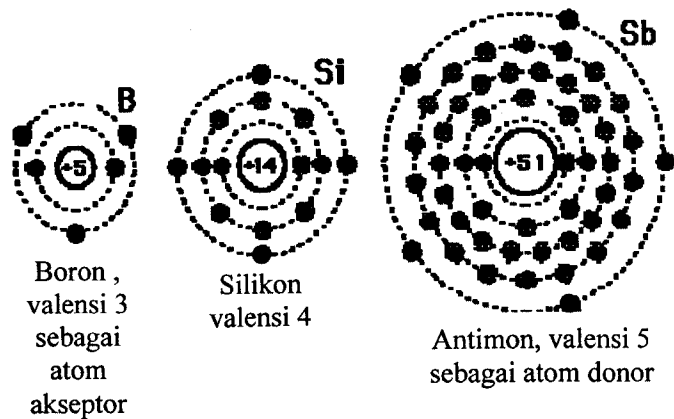
Rangkaian Pengolah Sinyal

Dasar aplikasi pada rangkaian elektronika adalah prosesing informasi yang terkandung dalam sebuah sinyal atau biasa dikatakan dengan Prosesing Sinyal (*Signal Processing*). Rangkaian atau untai elektronika pengolah sinyal meliputi penyearah, penguat, osilator dan switching. Umumnya terdiri atas komponen-komponen aktif yang terbuat dari bahan semi konduktor seperti diode, transistor dan OP-AMP.

Pembahasan pada bab ini akan diawali dengan watak dari komponen yang menyusun rangkaian hingga prinsip dasar sebuah rangkaian elektronis, macam dari setiap jenis rangkaian dan bagaimana watak masing-masing rangkaian.

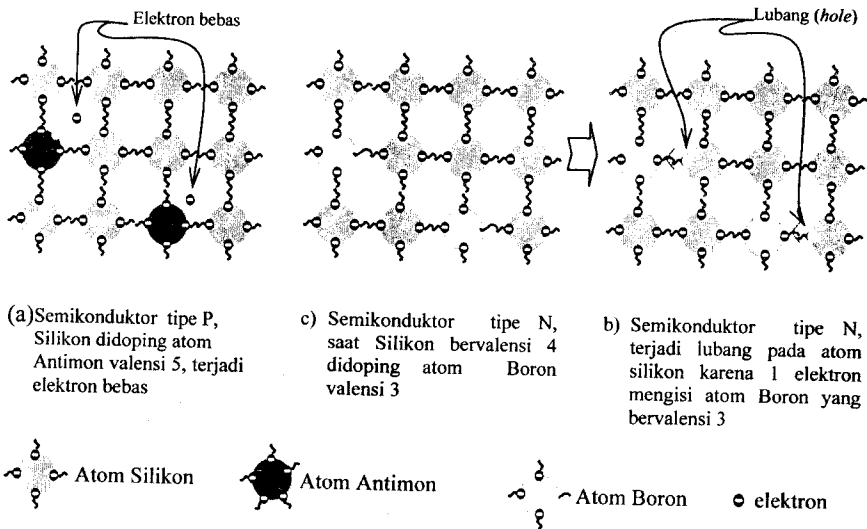


Bahan semikonduktor adalah bahan yang bersifat diantara isolator dan konduktor yang pada keadaan tertentu elektronnya dapat mengalir. Kebanyakan bahan semikonduktor terutama terbuat dari campuran silikon(Si) bervalensi 4, Antimon (Sb) atau Arsen atau Phosphor dengan valensi 5 sebagai atom donor, dan Boron(B) dengan valensi 3 sebagai atom akseptor. Atom-atom ini digambarkan seperti pada gambar 5.1.



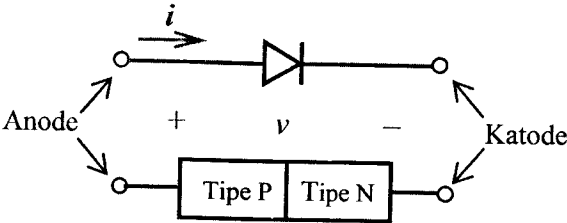
Gambar 5.1 Atom dengan valensi 3, 4, dan 5

Atom Silikon (Si) dengan valensi 4 yang dicampur dengan Antimon(Sb) dengan valensi 5 disebut material Tipe P dan dikatakan kelebihan elektron sehingga mempunyai lebih banyak elektron bebas. Sedang silikon yang didoping dengan Boron (B) disebut sebagai material Tipe N dan dikatakan lebih banyak lubang (hole) atau dianggap kelebihan muatan positif seperti terlihat pada gambar 5.2.

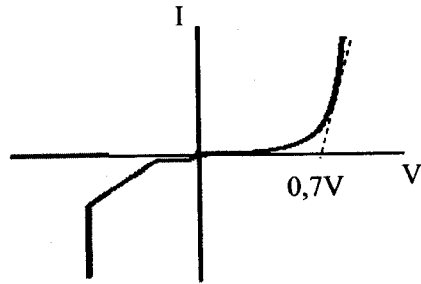


Gambar 5.2 Semikonduktor tipe P dan tipe N

Diode adalah piranti elektronis dengan dua terminal dan tersusun atas semikonduktor tipe n dan tipe p sesuai dengan gambar 5.3. Terminal pada sisi P disebut Anode dan terminal pada sisi N disebut Katode. Diode merupakan elemen rangkaian nonlinier, karena mempunyai watak mengalirkan arus setelah melampaui nilai tegangan *barrier* sebesar 0,7 Volt seperti pada gambar 5.4.

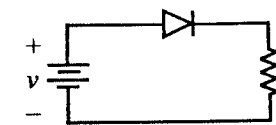


Gambar 5.3 Diode, simbol dan gabungan semikonduktor tipe P dan tipe N

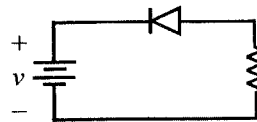


Gambar 5.4 Diode, simbol dan gabungan semikonduktor tipe P dan tipe N

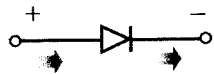
Diode dianggap sebagai katub elektronis karena mengalirkan arus untuk satu arah saja. Bila anode dihubungkan dengan suplai tegangan positif atau bias maju maka diode akan bersifat sebagai penghantar yang baik. Dan sebaliknya, bila anode disuplai oleh tegangan negatif atau Bias mundur maka diode tidak akan menghantarkan arus seperti terlihat pada gambar 5.5.



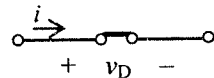
Bias maju, $v > v_D$



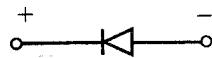
Bias mundur, $I = 0$



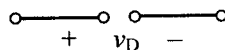
Arus mengalir lewat diode
Diode sebagai penghantar yang ideal



$$i > 0 \Rightarrow v_D = 0$$



Arus ditahan oleh diode
Diode bersifat resistansi tinggi

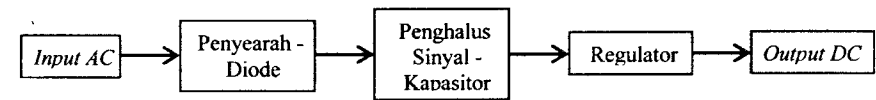


$$v_D < 0 \Rightarrow i = 0$$

Gambar 5.5 Diode dengan bias maju dan bias mundur

5.1 Penyearah (*Rectifier*) dan Filter

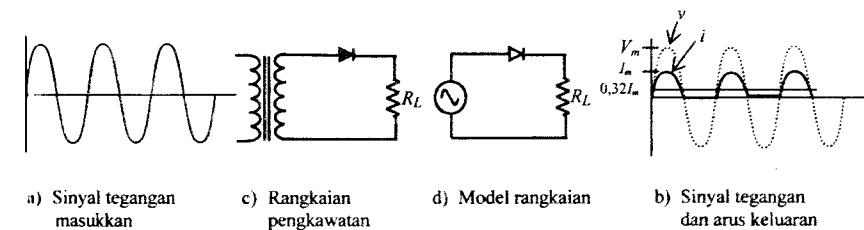
Sifat ketidaklinieran diode digunakan untuk mengubah tegangan bolak balik menjadi tegangan searah sehingga disebut sebagai penyearah (*Rectifier*), untuk memperhalus bentuk pulsa digunakan filter. Rangkaian penyearah menggunakan satu, dua bahkan empat diode untuk berbagai tingkat penyearahan. Untuk filter digunakan elemen penyimpan energi yakni kapasitor dan induktor sehingga diperoleh sinyal arus keluaran searah yang halus dan steady. Kombinasi dari suplai tegangan bolak balik, penyearah dan filter disebut penyedia daya (*power supply*). Diagram blok penyedia daya digambarkan pada gambar 5.6.



Gambar 5.6 Diagram blok penyedia daya (*power supply*)

a. Penyearah Setengah Gelombang

Rangkaian ini menggunakan satu diode seperti pada gambar 5.6. Masukkan berupa sinyal bolak-balik setelah melewati diode menjadi sinyal searah.



Gambar 5.7 Diagram blok penyedia daya (*power supply*)

Untuk analisis pendekatan dianggap diode ideal dan resistansi trafo diabaikan. Dengan sinyal masukan $v = V_m \sin \omega t$ akan diperoleh arus keluaran sebesar,

$$\begin{cases} i = \frac{V_m \sin \omega t}{R_L} = \frac{V_m \sin \omega t}{R_L} & \text{untuk } 0 \leq \omega t \leq \pi \\ i = 0 & \text{untuk } \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (5.1)$$

Sebagai terlihat pada gambar 5.6d.

$$\begin{aligned} I_{dc} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{V_m \sin \omega t}{R_L} d(\omega t) + 0 \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{V_m}{R_L} [-\cos \omega t]_0^{\pi} = \frac{V_m}{\pi R_L} = \frac{I_m}{\pi} = 0,32 I_m \end{aligned} \quad (5.2)$$

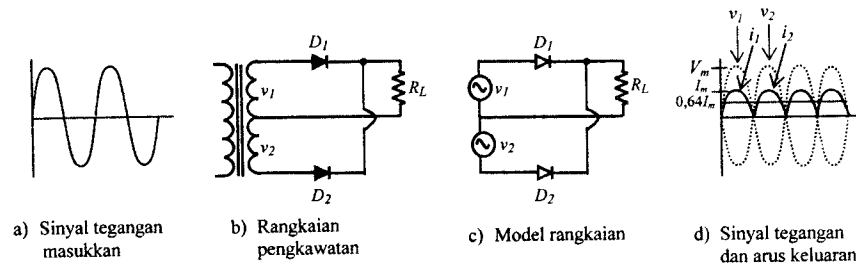
Contoh soal 5.1

- 1) Rektifier setengah gelombang disuplai oleh sumber tegangan 120 V_{RMS}. Berapa tegangan keluaran rata-rata rektifier dengan mengabaikan penurunan tegangan pada diode?

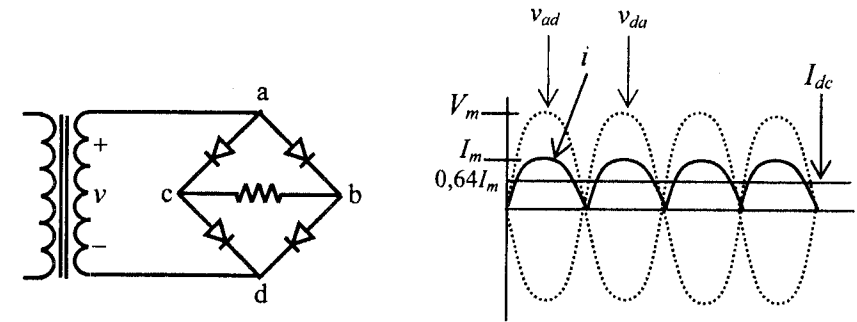
Jawab: $V_m = \frac{V_{RMS}}{0,707} = \frac{120}{0,707} = 169,7 \text{ V}$
 maka $V_m = 0,3183 \times V_m$
 $= 54,02 \text{ V}$

b. Penyearah Gelombang Penuh

Rangkaian ini menggunakan dua diode serta trafo center tap disuplai oleh seperti pada gambar 5.8. Dioda 2 bersifat sebagai pembalik fase sehingga akan diperoleh keluaran yang nilainya 2 kali lebih besar dari penyearah setengah gelombang dan lebih kontinyu.



Gambar 5.8 Penyearah gelombang penuh



Gambar 5.9 Penyearah model jembatan

Selain menggunakan dua diode dapat juga dengan empat diode dibentuk sebagai jembatan seperti pada gambar 5.9. Tetapi rangkaian ini kurang menguntungkan karena memerlukan empat diode dibandingkan dengan dua diode.

$$I_{dc} = \frac{2 V_m}{\pi R_L} = \frac{2 I_m}{\pi} = 0,637 I_m \quad (5.3)$$

Contoh soal 5.2

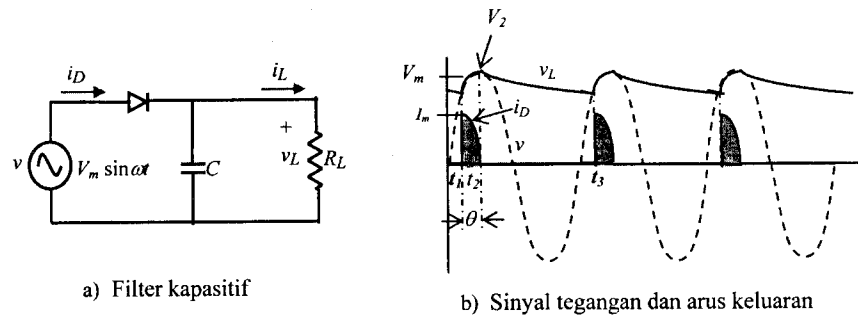
- 1) Penyearah gelombang penuh dengan trafo center tap disuplai oleh tegangan sisi sekunder trafo sebesar 10 Volt. Berapa tegangan keluaran rata-rata bila penurunan tegangan diode tidak diabaikan

Jawab: $V_p = V_{in} - V_{D1} - V_{D2} = 10 - 0,7 - 0,7 = 8,6 \text{ V}$
 $V_{DC} = 0,637 \times 8,6 \text{ V} = 5,48 \text{ V}$

c. Filter

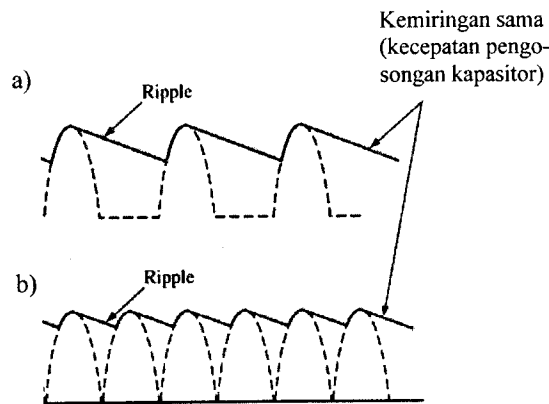
Sinyal keluaran penyearah gelombang penuh yang diperoleh masih terdapat riak (*ripple*) pada gelombang tegangan keluaran dari R_L . Untuk memperbaiki kualitas penyearahan maka dipasang filter kapasitif yang akan menyebabkan komponen sinyal listrik dc diizinkan

lewat dan menghilangkan komponen ac sehingga diperoleh sinyal keluaran sesuai yang diinginkan. Lihat gambar 5.10.



Gambar 5.10 Penyearah dengan filter kapasitif

Kapasitor dipasang secara paralel dengan resistansi beban dan bertindak sebagai sebuah tanki yang menyimpan muatan selama diode menghantar dan melepas muatan ke beban selama diode tidak mengalirkan arus.



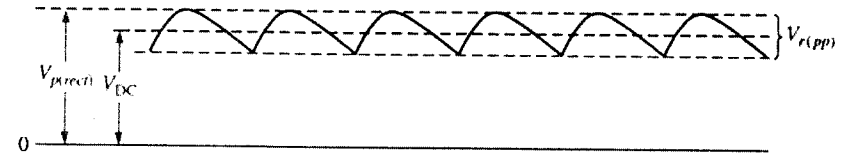
Gambar 5.11 Bentuk ripple untuk:
a) Penyearah setengah gelombang
b) Penyearah gelombang penuh

Terlihat jelas penyearah gelombang penuh lebih menguntungkan dibandingkan dengan penyearah setengah gelombang karena kapasitor

dapat lebih efektif mengurangi ripple ketika waktu untuk mencapai puncak gelombang lebih pendek, lihat gambar 5.11

Perhitungan tegangan ripple.

Saat $t = 0$ sumber tegangan sama dengan nol tetapi tegangan beban $v_L = v_C$, kapasitor melepaskan muatan ke beban. Saat $t = t_1$ kenaikan suplai tegangan mencapai v_L dan diode menghantar. Arus diode i_D meningkat sehingga $i_C = C dv/dt$; kemudian turun menjadi nol, diode akan off saat v lebih rendah dari v_L .



Gambar 5.12

Dari gambar 5.10 dan 5.12 dapat dianalisis $V_2 = V_{p(rect)} = V_m - 0,7$ Volt, untuk diode silikon. Dengan pertimbangan adanya tegangan barrier sebesar 0,7 volt.

$$\text{Saat pengisian muatan, } t_1 < t < t_2, \quad v_L = V_m \sin \omega t \quad (5.4)$$

$$\text{Saat pelepasan muatan, } t_2 < t < t_3, \quad v_L = V_2 e^{-(t-t_2)/\tau} \quad (5.5)$$

$$\tau = \text{konstanta waktu} = R_L C$$

Arus beban i_L berbanding lurus dengan tegangan beban. Karena i_L tidak pernah berharga nol maka harga rata-rata atau komponen dc relatif besar dibandingkan penyearah setengah gelombang dan komponen ac menjadi lebih kecil. Tegangan ripple dikurangi dengan penggunaan kapasitor.

Dengan asumsi konstanta waktu $R_L C$ cukup besar dibandingkan dengan periode sumber tegangan ac $= T$ dan penurunan tegangan $v_L = v_C$ menjadi kecil dan tegangan ripple V_r kecil, waktu pengisian muatan $t_2 - t_1$ kecil, v_C mendekati konstan maka semua arus beban disuplai oleh kapasitor dan besar muatan yang dialirkan ke beban adalah,

$$\Delta q = I_{dc} T = C \Delta v_C = C V_r \quad (5.6)$$

Sehingga tegangan riak (*ripple*) $V_r = \frac{I_{dc} T}{C} = \frac{I_{dc}}{fC} = \frac{V_{dc}}{fR_L C} \quad (5.7)$

Tegangan rata-rata keluaran $V_{dc} = \frac{V_m}{1 + \frac{1}{(2f_o RC)}} \quad (5.8)$

Untuk frekuensi keluaran $f_o = 2f_{in} \quad (5.9)$

Contoh Soal 5.3

- 1) Penyearah gelombang penuh bentuk jembatan disuplai dari sisi sekunder trafo 15V dengan frekuensi 60 Hz. Beban senilai 120Ω. Penyearah diberi filter dengan nilai $C=100\mu F$ dan $C=1000\mu F$. Berapa tegangan keluaran tanpa mengabaikan penurunan tegangan diode dan frekuensi keluaran penyearah.

Jawab: $V_p = V_m = V_{in} - V_{D1} - V_{D2} = 15 - 0,7 - 0,7 = 13,6V$
 $f_o = 2 \times 60 \text{ Hz} = 120 \text{ Hz}$

- a) Untuk $C = 100\mu F$

$$V_{dc} = \frac{V_m}{1 + \frac{1}{(2f_o RC)}}$$

$$V_{dc} = \frac{13,6}{1 + \frac{1}{(2.120.120.100.10^{-6})}} = 10.09 \text{ V}$$

- b) Untuk $C = 1000\mu F$

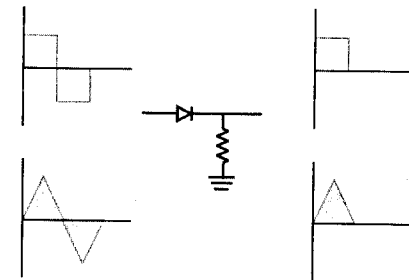
$$V_{DC} = \frac{V_m}{1 + \frac{1}{(2f_o RC)}}$$

$$V_{DC} = \frac{13,6}{1 + \frac{1}{(2.120.120.1000.10^{-6})}} = 13.14 \text{ V}$$

5.2 Clipping dan Clamping

a. Clipping

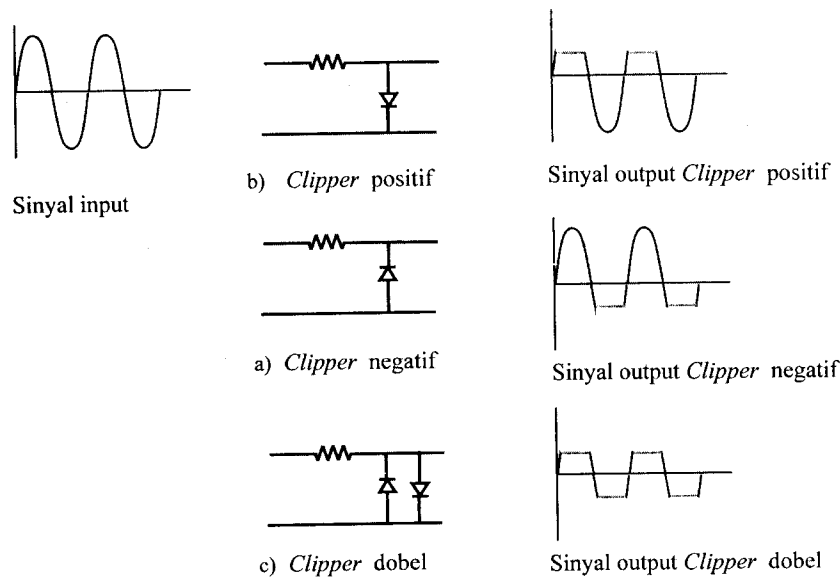
Diode juga digunakan dalam rangkaian pembentuk gelombang (*wave shaping*) antara lain *Clipperyakni* memotong atau menghilangkan bagian positif atau negatif ataupun dari keduanya. Tegangan *output* diperoleh sebagai hasil dari memotong tegangan *input* sampai batas tertentu V_{batas} . Di atas harga tersebut akan diclip hingga harga V_{batas} sehingga rangkaian ini juga disebut sebagai rangkaian pembatas.



Untuk rangkaian gambar 5.13 terlihat bahwa tegangan berbentuk apapun akan dipotong oleh diode dengan kondisi bias mundur dan tegangan bias maju kurang dari 0,7 V (untuk diode silicon).

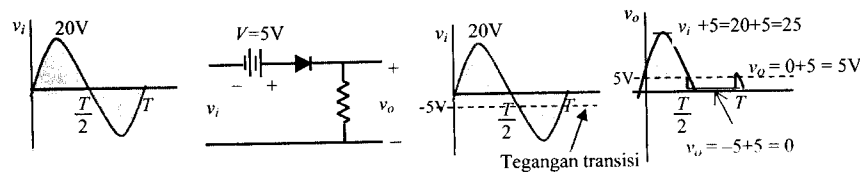
Gambar 5.13 Pembentukan gelombang dari clipper

Rangkaian ini mirip dengan rangkaian pembagi tegangan dengan watak diode sebagai resistansi tinggi di bawah 0,6 Volt dan resistansi yang rendah bila di atas 0.6 Volt. Rangkaian clipper ada dua yakni clipper positif dan clipper negatif seperti pada gambar 5.14.



Gambar 5.14 Jenis-jenis clipper

Penambahan sumber dc secara seri dengan diode pada rangkaian clipper mengubah nilai efektif kerja bias maju pada diode. Pada gambar 5.15 sekaligus diberikan contoh nilai-nilai perolehan tegangan output v_o untuk harga tegangan input v_i .



Gambar 5.15 Contoh penambahan sumber dc pada rangkaian clipper

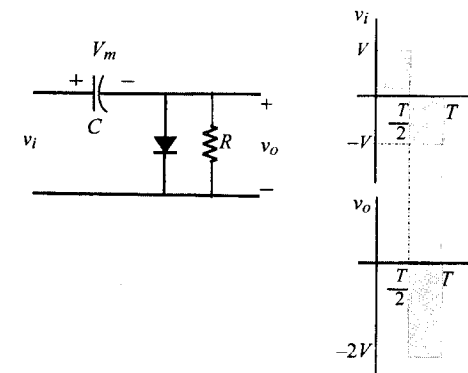
b. Clamping

Untuk memperoleh kesesuaian gambar pada pesawat televisi, nilai tegangan puncak untuk beberapa sinyal harus dipertahankan

(*clamp*) pada tingkat yang ditentukan. Demikian juga pemasangan kopling kapasitor pada beberapa bagian dari amplifier dimaksudkan menyederhanakan pemberian bias DC, tetapi sinyal acuan DC tersebut akan berayun (*swing*); untuk itu diperlukan *clammer* atau *dc restorer* agar menjaga (*clamp*) untuk mengembalikan sinyal pada bentuk semula.

Dalam hal ini dipasang sebuah diode dan kapasitor yang memberikan muatan sampai ke harga puncak untuk kekurangan yang terjadi. Saat memuati, kapasitor bertindak seperti baterai yang seri dengan tegangan input. Diode dan kapasitor dikombinasikan untuk mempertahankan sinyal AC ke tingkat tegangan DC tertentu. Sinyal input dapat berupa apa saja, sinus, kotak maupun segitiga.

Pemasangan diode seperti pada gambar 5.16 membentuk rangkaian Clamper Negatif.



Gambar 5.16 Rangkaian Clamper dan pembentukan sinyal

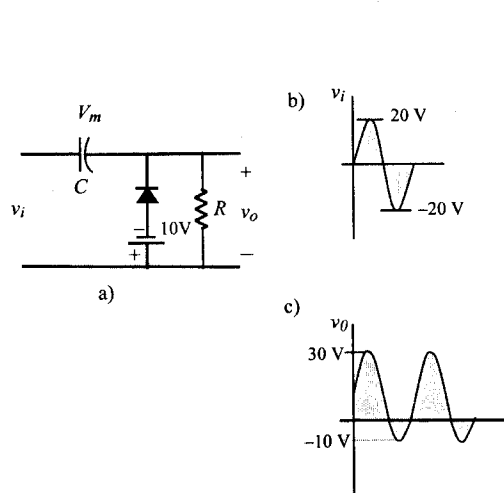
Selama setengah siklus positif diode menghantar dan seolah-olah terjadi hubung singkat. Kapasitor dimuati hingga mencapai tegangan puncak input yakni V_m . Selama interval waktu tersebut tegangan output = 0

Bila polaritas input menjadi negatif pada setengah siklus berikutnya diode akan terbuka dan tegangan output dapat dihitung berdasar persamaan edaran:

$$v_o = v_i - V_m \quad (5.10)$$

Karena tegangan maksimum input adalah V maka $v_o = -V - V = -2V$.

Penambahan sumber DC memungkinkan pengaturan tingkat *clamping* pada nilai yang diinginkan seperti pada gambar 5.17, disebut rangkaian Biased Clamper. Karena baterai dihubungkan secara seri dengan diode maka tegangan *output* mengacu pada tegangan baterai V_B . Untuk pemasangan diode seperti dalam gambar 5.17 disebut Positif Clamper.



Gambar 5.17 Rangkaian Biased Clamper dan pembentukan sinyal

Saat setengah siklus positif, diode mendapat bias mundur bersifat tidak menghantar. Persamaan edaran

$$v_o = v_i + v_C \text{ dan harga } v_C = v_i - V_B$$

sehingga tegangan *output* $v_o = 20 + 20 - 10 = 30$ Volt

Untuk setengah siklus negatif berikutnya, diode menghantar dan arus mengalir.

Kapasitor diberi muatan sampai tegangan puncak *input* yakni $-20V$.

Sehingga tegangan output, $v_o = v_i + v_C$

$$v_C = -20 - 10 = -30 \text{ V}$$

$$v_o = 20 - 30 = -10 \text{ V}$$

Bentuk sinyal *output* dapat dilihat pada gambar 5.17c.

5.3 Diferensiator dan Integrator

a. Differentiator

Rangkaian sederhana yang *output*nya merupakan hasil derivatif dari *input* dapat dilihat pada gambar 5.18. Rangkaian ini terdiri atas

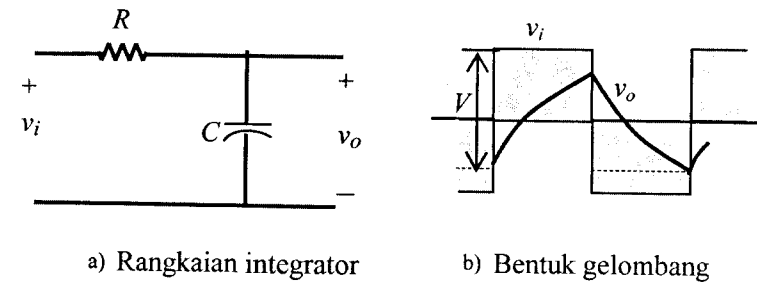
R dan C . Untuk *input* berupa kotak maka tegangan *output* sebanding dengan pelepasan arus pada kapasitor. Persamaan edaran mengikuti hukum Kirchoff adalah $v_i = v_C + v_R \cong v_C$.

Bila v_R sangat kecil dibandingkan v_C , maka

$$v_o = v_R = Ri = Ri \frac{dv_C}{dt} = Ri \frac{dv_i}{dt} \quad (5.11)$$

b. Integrator

Bila posisi elemen R dan C dipertukarkan posisinya maka akan diperoleh rangkaian integrator, lihat gambar 5.18.



Gambar 5.18 Rangkaian integrator dan bentuk gelombang

Bila konstanta waktu RC cukup besar dibanding dengan periode T dari gelombang kotak maka *output* berupa gelombang gigi gergaji dan sebanding dengan konstanta waktu. Secara umum $v_i = v_C + v_R \cong v_R = iR$

dengan v_C cukup kecil dibanding v_R ($RC > T$)

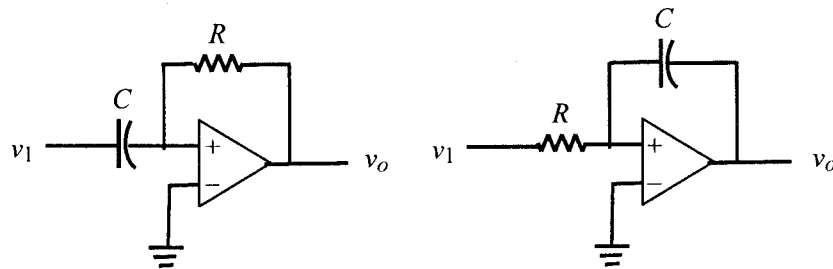
$$v_o = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{RC} \int v_i dt \quad (5.12)$$

c. Operational Amplifier (Opamp) Sebagai Diferensiator

Op-amp digunakan pertama kali pada analog komputer untuk perhitungan matematis, sehingga harus mempunyai kinerja yang tinggi dan berbiaya rendah. *Op-amp* adalah semikonduktor yang terdiri dari

puluhan atau lebih transistor dan juga resistor dalam sebuah paket yang disebut *Integrated circuit (IC)*. Rangkaian sederhana *Op-amp* tergambar pada gambar 5.19. Dari rangkaian pada gambar $v_i \cong 0$, simpul n pada ground dengan potensial nol dan $I \cong 0$ sehingga jumlah aljabar arus pada simpul n:

$$C \frac{dv_1}{dt} + \frac{v_o}{R} = 0 \text{ atau } v_o = -RC \frac{dv_1}{dt} \quad (5.13)$$



a) Op-amp Diferensiator

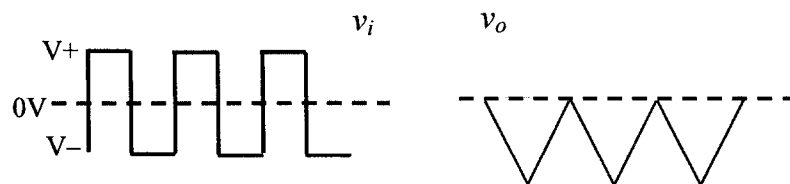
b) Op-amp Integrator

Gambar 5.19 *Op-amp sebagai diferensiator dan integrator*

Bila *Op-amp* sebagai integrator pada gambar 5.19b.

$$\frac{v_1}{R} = I = -C \frac{dv_o}{dt} \quad (5.14)$$

$$v_o = \frac{-Q}{C} = \frac{-1}{C} \int i \, dt = \frac{-1}{RC} \int v_i \, dt \quad (5.15)$$



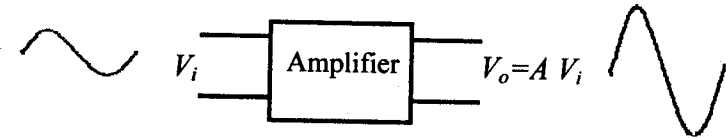
a) Sinyal input

b) Sinyal output

Gambar 5.20 *Bentuk gelombang pada integrator*

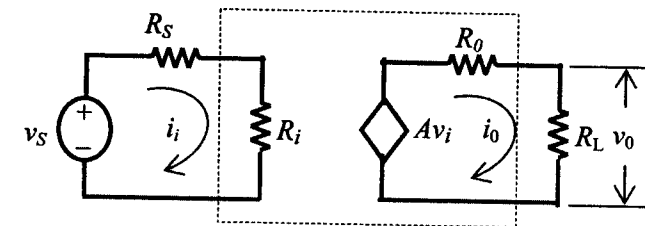
5.4 Penguat (*Amplifier*) dan Penguat Operasional (*Opamp*)

Sinyal yang diproses melalui sensor dan transduser biasanya kecil nilainya sehingga perlu untuk dikuatkan. Piranti elektronis yang sangat mampu untuk berperan sebagai penguat adalah transistor. Gambaran sederhana tentang diagram blok penguat seperti pada gambar 5.21.



Gambar 5.21 *Bentuk sinyal sebelum dan sesudah melewati amplifier*

Faktor A adalah nilai penguatan tegangan hubung buka atau *Gain* dari *amplifier*. Transistor sebagai penguat dapat dimodelkan dalam rangkaian seperti pada gambar 5.22.



Gambar 5.22 *Model rangkaian amplifier*

Edaran 1 $Av_i - R_o i_o - R_L i_o = 0$ maka $i_o = \frac{Av_i}{R_o + R_L}$

$$v_o = R_o R_L i_o = \frac{Av_i}{R_o + R_L}$$

Edaran 2 $v_s - R_s i_i - R_i i_i = 0$ $i_i = \frac{v_s}{R_s + R_i}$

$$v_i = R_i i_i = R_i \frac{v_s}{R_s + R_i}$$

$$\begin{aligned}\text{Distribusi ke } v_i &= \frac{R_L A v_i}{R_o + R_L} \\ &= \frac{R_L}{(R_o + R_L)} \frac{R_i}{(R_s + R_i)} A v_s\end{aligned}$$

Nilai riil gain dari amplifier (A_r) diperoleh dengan

$$\begin{aligned}A_r &= \frac{v_o}{v_i} = \frac{A v_i \left[\frac{R_L}{(R_s + R_i)} \right] \left[\frac{R_L}{(R_L + R_o)} \right]}{v_s} \\ A_r &= A \left(\frac{R_i}{(R_s + R_i)} \right) \left(\frac{R_L}{(R_L + R_o)} \right) \quad (5.16)\end{aligned}$$

Amplifier ideal jika $R_s = R_o = 0$ sehingga $v_o = A v_s$

Atau jika $R_L = R_i = \infty$ sehingga $v_o = A v_s$

Harga A tidak dipengaruhi frekuensi sinyal input dan diharapkan A konstan.

Contoh soal 5.4

- 1) Sebuah *amplifier* dengan nilai $R_i = 1 \text{ M}\Omega$, $R_o = 10 \Omega$ dan $A = 100$. Hitung nilai penguatan bila $R_s = R_L = 1 \text{ k}\Omega$.

Jawab:

$$\begin{aligned}A_r &= A \left(\frac{R_i}{(R_s + R_i)} \right) \left(\frac{R_L}{(R_L + R_o)} \right) \\ A_r &= 100 \left(\frac{1 \cdot 10^6}{10^3 + 10^6} \right) \left(\frac{10^3}{10^3 + 10} \right) = 99 \rightarrow \text{ideal}\end{aligned}$$

5.5 Daftar Pustaka

- Floyd, Thomas, F., *Principles of Electric Circuit*, Prentice Hall, 2000.
- Hayt Jr., William H.; Kemmerly, Jack E., *Engineering Circuit Analysis*, McGraw-Hill, Inc., 1993.
- Johnson, David E., *Basic Electric Circuit Analysis*, Prentice Hall, Inc. 1995
- Paul, C.R., *Introduction To Electrical Engineering*, McGraw-Hill, Inc., 1992.
- Rizzoni, Giorgio., *Principles and applications of Electrical Engineering*, Third edition, McGraw-Hill, 2000
- Ryder, John D., *Electrical and Electronic Engineering*, McGraw-Hill Book Company, 1967
- Sastra Kusuma Wijaya, *Diktat Elektronika I*, FMIPA UI
- Smith, R. J. *Circuits, Devices and Systems*. New York: John Wiley and Sons Inc., 1972.
- Clamping available at sst.umt.edu.pk/courses/ce206.ppt
- Chapter 6 Elektronics available at metalab.uniten.edu.my/~farrukh/.../mahalik.ppt
- Electronic available at www.ael.utcluj.ro/ORGANIZARE/OVIDIU/cur3
- Chapter 2a available at www.dartec.com/MIC4120.ppt
- Elec-Chap02 available at wns.ice.cycu.edu.tw/~mhYang.ppt
- Diode ch02 Lect available at commons.bcit.ca/cbennie/files.ppt

-oo0oo-

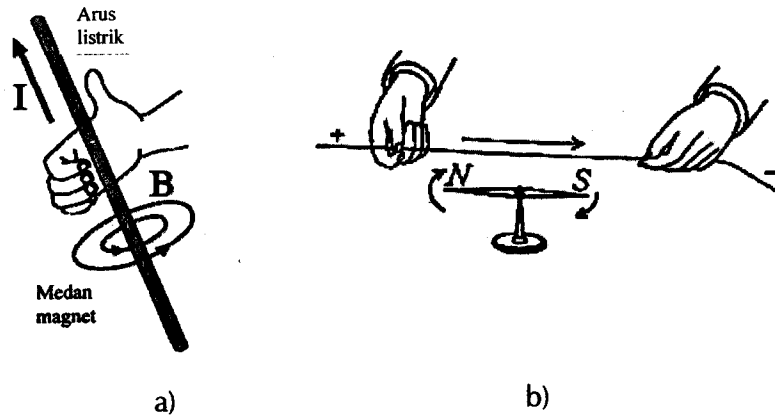
Induksi Elektromagnetis

Telah diketahui bahwa energi ternyata sangat berperan dalam kehidupan manusia. Untuk itu perlu dipahami konsep pembangkitan energi yang ternyata berdasar pada proses konversi energi elektromekanis. Proses ini hanya dapat berlangsung bila tersedia medan magnet dan seberapa besar pengaruh fluks magnet terhadap energi yang dibangkitkan.

Pada bab ini akan dijelaskan tentang fluks magnet, kerapatan fluks, gaya gerak magnet, konsep rangkaian magnetis serta piranti-piranti yang berdasar pada prinsip medan magnet, misal trafo, motor dan generator.

6.1 Medan Magnet dan Rangkaiannya

Jika di sekeliling kawat penghantar dialiri arus listrik maka di sekeliling kawat akan terjadi medan magnet dengan arah seperti pada gambar 6.1a. Dan hal ini akan terlihat lebih nyata bila di bawah kawat diletakkan jarum kompas, jarum kompas akan bergerak sesuai arah yang ada pada gambar 6.1b.



Gambar 6.1 Medan magnet di sekeliling penghantar yang dilalui arus

a. Kerapatan Fluks Magnet

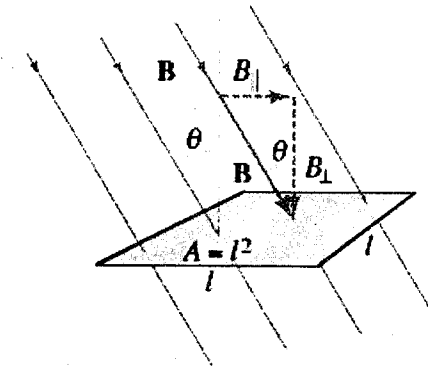
Medan magnet digambarkan secara imajiner oleh adanya garis-garis gaya magnet dan dinyatakan nilainya dengan kerapatan fluks magnet, B atau Tesla. Jumlah garis-garis gaya atau fluks magnet dinyatakan dengan Φ ;

$$\Phi = \int B \cdot dA \quad (6.1)$$

Φ = fluks magnet-Weber

A = luasan- m^2

B = kerapatan fluks magnet-Tesla

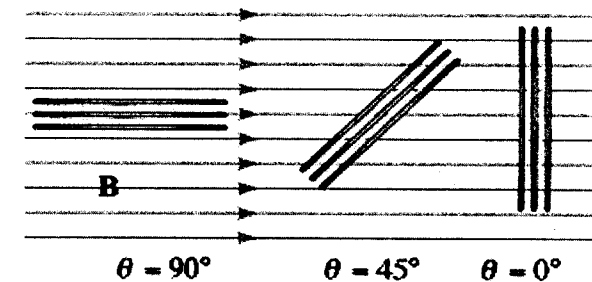


Gambar 6.2 Kerapatan fluks ada sebuah medan magnet

Apabila garis-garis gaya magnet jatuh tidak tegak lurus pada sebuah luasan A seperti tergambar pada gambar 6.2 maka nilai fluks magnet dapat dihitung berdasar persamaan:

$$\Phi = B A \cos \theta \quad (6.2)$$

dengan θ adalah sudut diantara kerapatan B dan luasan A .



Gambar 6.3 Berbagai posisi kumparan terhadap medan magnet B

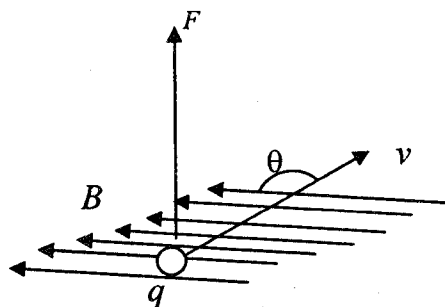
Untuk berbagai posisi kumparan seperti pada gambar 6.3,

$\theta = 90^\circ$ maka $\Phi = 0$

$\theta = 45^\circ$ maka $\Phi = 0,707 BA$

$\theta = 0^\circ$ maka $\Phi = BA$ merupakan nilai fluks maksimum.

Kerapatan fluks magnet dibangkitkan bila muatan 1 Coulomb bergerak dengan kecepatan v sebesar 1 meter per detik seperti pada gambar 6.4.



Gaya F yang terjadi akibat adanya muatan q yang bergerak dengan kecepatan v merupakan besaran vektor sebagai:

$$F = qv \times B \quad (6.3)$$

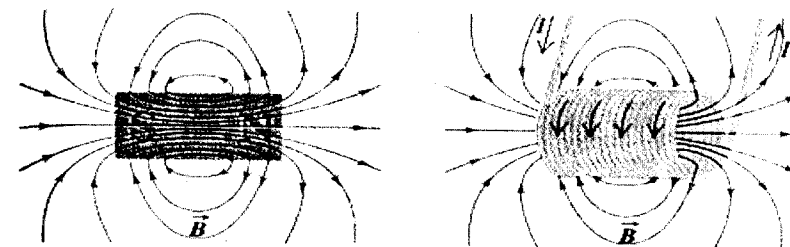
Gambar 6.4 Gaya magnet oleh adanya muatan yang bergerak dalam medan magnet

F = Gaya magnet dalam Newton
 q = muatan dalam Coulomb
 v = kecepatan dalam meter/detik
 B = kerapatan fluks magnet dalam Tesla

$$B = \frac{F}{qv} = \frac{\text{Newton}}{\text{coulomb.m/detik}} = \frac{\text{N.detik}}{\text{Coul.m}} = \frac{\text{V.detik}}{\text{m.m}} = \frac{\text{Weber}}{\text{m}^2} = \frac{\Phi}{\text{m}^2}$$

Kecuali untuk muatan q pada persamaan 6.4, maka besaran yang lain yakni F , v dan B semua ini mempunyai besar dan arah yang masing-masing saling tegak lurus. Arah ketiga besaran ini dapat digambarkan dengan arah penunjukkan berdasar jari-jari tangan kanan (*Right Hand Rule*), dengan F sesuai arah ibu jari, v sesuai dengan arah telunjuk dan B sesuai dengan jari-jari tangan yang dibengkokkan.

Seperti halnya pada medan listrik maka medan magnet juga digambarkan dengan adanya garis-garis gaya magnet yang sebenarnya fiktif belaka. Banyaknya garis-garis gaya disebut dengan fluks magnet (Φ). Gambaran arah garis-garis gaya dari sebuah batang magnet sebagai magnet alam dan dari sebuah kumparan yang merupakan magnet buatan dapat dilihat pada gambar 6.4.

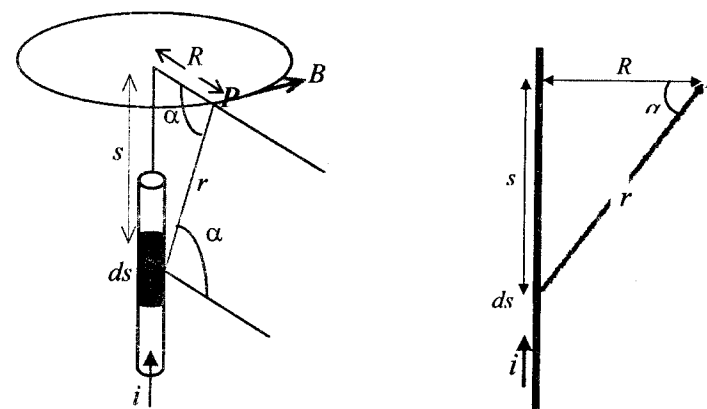


Gambar 6.5 a) Garis-garis gaya sekeliling batang magnet
 b) Garis-garis gaya sekeliling kumparan/solenoid

b. Medan Magnet Akibat Penghantar yang Dilalui Arus

Untuk menghitung besar medan magnet akibat penghantar dalam berbagai konfigurasi, terlebih dahulu dilakukan perhitungan untuk penghantar lurus sebagai acuannya. Bila semua muatan dq bergerak sepanjang ds , yakni panjang dari penghantar berwarna gelap dalam waktu dt dengan kecepatan v . Maka $ds = v dt$. Sehingga persamaan hubungan arus dengan muatan yang bergerak:

$$i ds = \frac{dq}{dt}(v dt) = dq v \quad (6.4)$$



Gambar 6.6 Medan magnet akibat penghantar dilalui arus
 a) dalam 3 dimensi dan b) dalam 2 dimensi

Dari gambar 6.6 $r = \sqrt{s^2 + R^2}$

$$\sin \alpha = \frac{R}{\sqrt{s^2 + R^2}}$$

Terlihat bahwa arus pada elemen ds ekuivalen dengan muatan dq yang bergerak dengan kecepatan v . Dari sebuah penelitian ternyata nilai medan magnet B akibat gerak muatan adalah

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \sin \alpha}{r^2} \quad (6.5)$$

Bila dihubungkan dengan persamaan (6.4) maka medan magnet B menjadi

$$|B| = \int |B| = \left[\frac{\mu_0 I}{4\pi} \right] \int \frac{\sin \alpha \, d\alpha}{r^2} \quad (6.6)$$

Untuk mencari kerapatan medan magnet B di titik P oleh adanya penghantar panjang yang dilalui arus dengan menggunakan persamaan 6.5:

$$B = \int_{-\infty}^{\infty} dB = 2 \int_0^{\infty} dB = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin \alpha \, ds}{r^2}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{R}{\sqrt{s^2 + R^2}} \frac{ds}{s^2 + R^2} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{R ds}{(s^2 + R^2)^{3/2}}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{s}{(s^2 + R^2)^{3/2}} \right] = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (6.7)$$

μ_0 = permeabilitas di ruang hampa = $4\pi \times 10^{-7}$.

Contoh soal 6.1

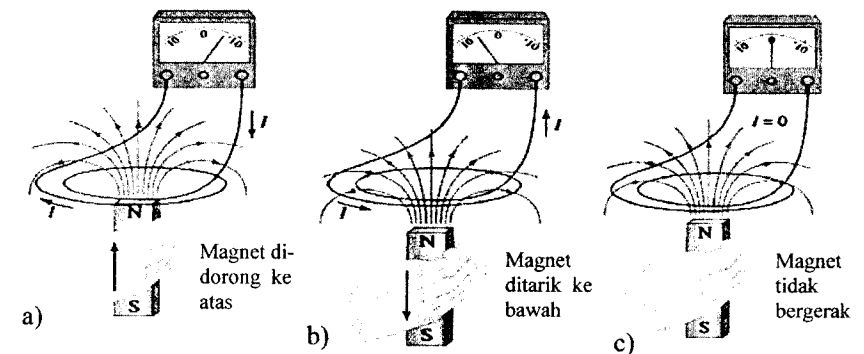
- 1) Kawat penghantar menempel di dinding dialiri arus 15 Amp. ke atas. Berapa besar medan magnet pada jarak 3 meter di utara kawat dan ke mana arahnya.

Jawab:

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} I}{2\pi r} = \frac{2 \times 10^{-7} 15}{3} = 1 \times 10^{-6} \text{ Tesla ke arah Barat}$$

6.2 Hukum Faraday

Apabila sebuah batang magnet digerakkan masuk dan keluar sebuah kumparan, ternyata akan dibangkitkan tegangan induksi pada ujung-ujung kumparan yang ditunjukkan oleh jarum penunjuk yang arahnya berubah-ubah. Arah arus melawan arah gerak batang magnet terlihat pada gambar 6.7.



Gambar 6.7 a) Jarum penunjuk bergerak ke kanan saat magnet bergerak masuk kumparan. b) Jarum bergerak ke kiri bila magnet dikeluarkan dari kumparan. c) Jarum menunjuk angka nol saat magnet diam

Hukum Faraday (1831) menyatakan bila ada perubahan fluks magnet yang dilingkupi kumparan terhadap waktu maka akan dibangkitkan tegangan induksi (emf) sehingga menyebabkan adanya arus mengalir. Besar tegangan yang dibangkitkan sebanding dengan jumlah lilitan dikalikan dengan besarnya perubahan fluks sebagaimana pada persamaan (6.8).

$$|\varepsilon| = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.8)$$

ε = tegangan induksi - Volt

N = jumlah lilitan kumparan

Φ = fluks magnet = $BA \cos \theta$ persamaan (6.2)

t = lama waktu-detik

Contoh soal 6.2

- 1) Kumparan berbentuk bujur sangkar dengan panjang sisi-sisinya 10 cm dengan jumlah lilitan 20. Saat awal pada posisi tegak lurus medan magnet yang besarnya 0,25 T. Berapa tegangan yang dibangkitkan bila kumparan kemudian dikeluarkan dari medan magnet dalam waktu 0,10 detik.

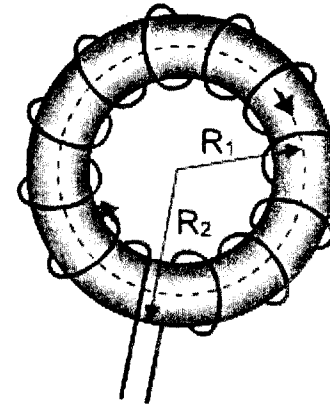
Jawab: $\Phi = B.A = B.l^2 = 0,25(10.10^{-2})^2$

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = 0 - 0,25 = -0,25 \times 10^{-2}$$

$$|\varepsilon| = N \frac{d\Phi}{dt} = -20 \frac{-0,25}{0,10} = 0,5 \text{ volt}$$

6.3 Rangkaian Ekivalen Magnet

Berdasarkan Hukum Ampere, sebuah toroida yang dialiri arus akan menyebabkan adanya gaya magnetisasi H dan bila dikalikan dengan panjang lintasan magnet pada toroida maka nilainya akan sebanding dengan jumlah kumparan dikalikan dengan arus yang mengalir. Dan hasil ini disebut Gaya Gerak Magnet atau Magneto Motive Force (\mathfrak{S}) dengan bentuk persaman 6.9



Gambar 6.8 Toroida yang dialiri arus i

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = Ni \quad (6.9)$$

$$Hl = Ni$$

$$H2\pi r = Ni$$

$$\mathfrak{S} = Hl = Ni \quad (6.10)$$

\mathfrak{S} = Magneto Motive Force

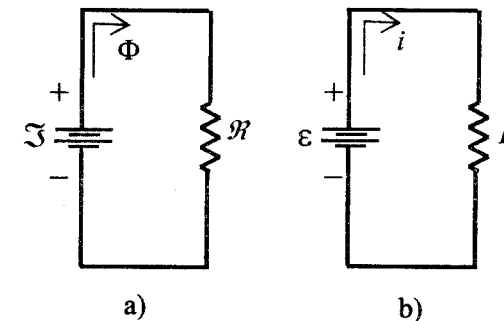
H = gaya magnetisasi-Ampere lilit/meter

l = panjang lintasan magnet-meter

N = jumlah lilitan

i = besarnya arus yang mengalir-Ampere

Persamaan-persamaan pada rangkaian medan magnet mirip dengan persamaan pada rangkaian listrik untuk resistansi. Hal ini dapat dianalisis sebagai berikut



Gambar 6.9 a) Rangkaian magnetis b) Rangkaian listrik

$$\Phi = \int B dA$$

$$B = \mu H,$$

$$\Phi = BA = \mu HA = \mu \frac{Ni}{l} A = \frac{\mathfrak{S}}{\mathfrak{R}} \quad (6.11)$$

$$\mathfrak{R} = \frac{1}{\mu A} \quad (6.12)$$

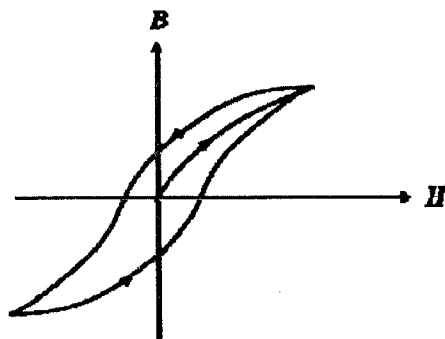
\mathfrak{R} = reluktansi merupakan sifat untuk menentukan garis fluks magnet dalam bahan dengan satuan-rels atau Ampere turn/Weber.

Analogi rangkaian magnetis dengan rangkaian listrik dapat dilihat pada tabel 6.1.

Tabel 6.1 Analogi rangkaian magnetis dengan rangkaian listrik

Rangkaian Magnetis		Rangkaian Listrik	
Gaya magnetisasi - Amp.turn $\mathfrak{S} = \Phi \mathfrak{R}$		Gaya Gerak Listrik-Volt $\varepsilon = IR$	
Fluks-Weber	Φ	Arus-Amp.	i
Reluktansi-rels (Amp.turn/Weber)	\mathfrak{R}	Resistansi-Ohm	R

Hubungan antara kerapatan fluks magnet dengan kuat medan magnet ditentukan oleh nilai permeabilitas μ dan membentuk sebuah kurva histerisis, sebagai gambar 6.10.



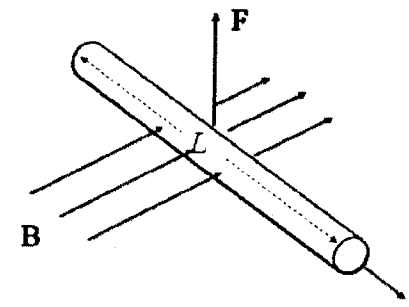
Gambar 6.10 Kurva histerisis, hubungan antara B dan H

Kurva ini menunjukkan saat nilai $H = 0$ maka nilai B belum tentu $= 0$, meskipun hubungan $B = \mu H$. Hal ini disebabkan masih adanya magnet sisa (*remance magnet*) walaupun arus yang menyebabkan adanya medan magnet ditiadakan.

6.4 Prinsip Elektromekanis

Sesuai dengan penjelasan pada 6.1a, bila ada muatan yang bergerak dalam medan magnet maka akan terjadi gaya pada muatan tersebut. Dengan pemikiran bahwa muatan yang bergerak identik de-

ngan arus maka jika ada arus yang mengalir pada sebuah penghantar, penghantar tersebut akan menderita gaya. Hal ini merupakan prinsip dasar elektromekanis yang diaplikasikan pada banyak peralatan.



Gambar 6.11 Gaya magnet pada penghantar yang dilalui arus

$$F = qv \times B$$

$$F = \frac{dq}{dt} v dt \times B$$

$$F = ILB \quad (6.13)$$

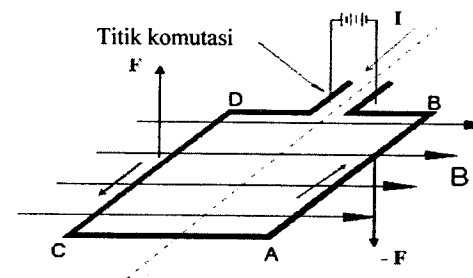
F = gaya - Newton

B = kerapatan fluks mag-net -T

L = panjang-meter

I = arus-Ampere

Penjelasan di atas merupakan konsep dasar dari motor listrik, yakni dengan adanya arus yang disuplai dari suplai tegangan eksternal akan menyebabkan terjadinya gaya yang bekerja untuk memutar kumparan. Merupakan konversi energi dari listrik ke mekanis.



Gambar 6.12 Gaya pada kumparan yang dilalui arus

Dari gambar 6.12, bila kumparan berada dalam medan magnet B Terjadi gaya F ke atas pada sisi DC sebesar: $F = I l B \sin \theta$, dengan I = DC dan θ adalah sudut antara arah normal permukaan kumparan dengan arah medan B . Juga terjadi gaya F ke bawah pada sisi AB Dengan terjadinya sepasang gaya maka akan terjadi momen putar atau Torsi (τ)

$$\tau = 2R \times F \quad (6.14)$$

τ = Torsi Newton meter

R = Jari-jari putaran kumparan- meter = $\frac{1}{2} w$

F = gaya - Newton

$$\text{maka } \tau = 2R \times F = 2 \times \frac{1}{2} w (B l I) = w \times l B I \sin \theta$$

$$\text{Luas kumparan} = A = w \times l$$

$$\text{Maka nilai torsi: } \tau = B I A \sin \theta \quad (6.15)$$

Contoh soal 6.3

- 3) Bila induksi magnet dalam motor dibatasi sebesar 1 Tesla dengan jumlah kumparan 500 lilitan berbentuk persegi panjang yang sisi-sisinya 5×10 cm dilalui arus 10 Amp, hitung besar torsi maksimum yang dibangkitkan.

$$\text{Jawab: } \tau = B I A \sin \theta$$

$$= 1 \times 500 \times 10 \text{ Amp} \times 5 \times 10^{-2} \times 10 \times 10^{-2} =$$

$$\tau = 25 \text{ N.m}$$

- 4) Sebuah kumparan dengan jari-jari 0,05 m dengan jumlah lilitan 30 pada bidang datar dilalui arus 5 Amp. dengan arah melawan jarum jam. Hitung torsi yang terjadi bila berada tegak lurus medan magnet sebesar 1,2 Tesla.

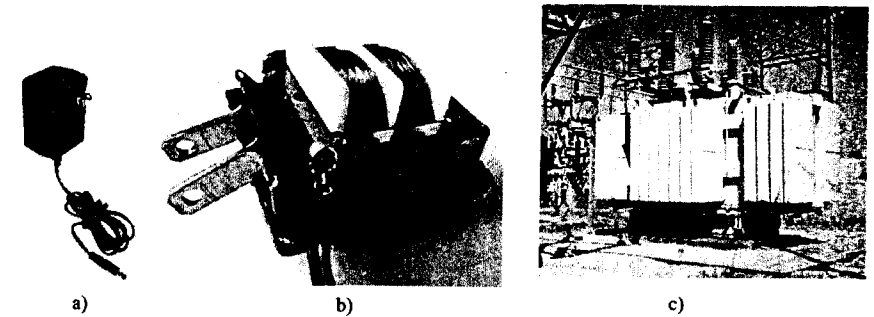
$$\text{Jawab: } A = \pi r^2 = 3,14 \times 0,05^2 = 7,85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\tau = B I A \sin \theta = 1,2 \times 5 \times 7,85 \times 10^{-3} \times 1$$

$$\tau = 1,41 \text{ N.m}$$

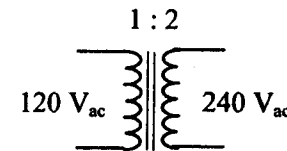
6.5 Transformator

Transformator atau trafo adalah peralatan berdasarkan adanya fluks medan magnet dan tegangan induksi yang dibangkitkan. Benda riilnya seperti terlihat pada gambar 6.13 dari ukuran kecil untuk pengisian baterai hingga trafo daya pada gambar c.



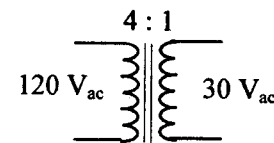
Gambar 6.13 Bentuk riil trafo a) Trafo pengisi (charging) baterai b) Trafo untuk keperluan rumah tangga c) Trafo daya di gardu-gardu induk

Jenis-jenis trafo berdasarkan perbandingan jumlah lilitan



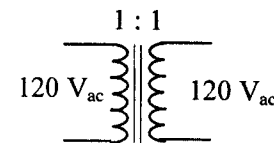
Trafo step up

Menyediakan tegangan sisi sekunder lebih tinggi dari sisi primer.



Trafo step down

Menyediakan tegangan sisi sekunder lebih rendah dari sisi primer.

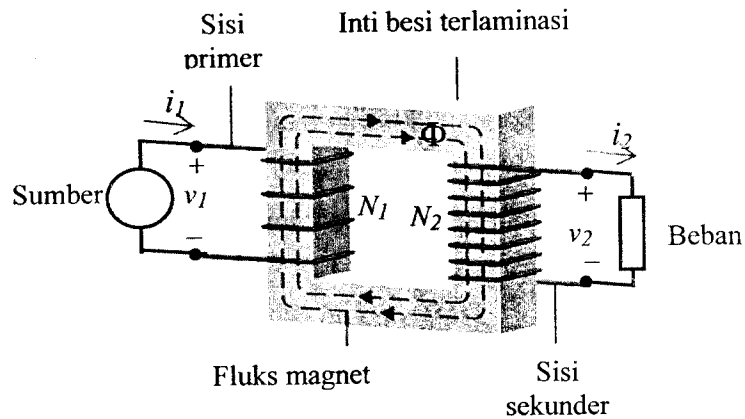


Trafo isolasi

Tegangan sisi sekunder sama dengan tegangan sisi primer, untuk mengisolasi suplai daya listrik dari jala-jala, untuk pelayanan proteksi.

Trafo terbuat dari inti besi yang diberi lilitan di kedua sisinya seperti pada gambar 6.14. Prinsip kerja trafo:

Bila pada kumparan sisi primer dialiri arus bolak balik maka pada inti besi akan dibangkitkan garis-garis gaya magnet (fluks magnet) yang mengalir mengelilingi inti. Fluks magnet yang sama akan dilingkupi oleh kumparan sisi sekunder sehingga pada sisi sekunder akan dibangkitkan tegangan induksi. Bila pada sisi sekunder merupakan rangkaian tertutup maka akan ada arus yang mengalir.



Gambar 6.14 Skema sebuah trafo

Tegangan induksi yang dibangkitkan pada sisi primer

$$V_p = V_p \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \quad (6.16)$$

Tegangan induksi yang dibangkitkan pada sisi sekunder

$$V_s = V_s \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \quad (6.17)$$

Karena fluks yang dilingkupi sisi primer sama dengan fluks yang dilingkupi sisi sekunder maka

$$\frac{V_p}{N_p} = \frac{V_s}{N_s} \quad (6.18)$$

Perbandingan transformasi

$$\frac{N_p}{N_s} = a \quad (6.19)$$

Bila trafo ideal tidak ada rugi-rugi maka daya sisi primer akan sama dengan daya sisi sekunder sehingga

$$P_1 = P_2 \quad (6.20)$$

$$V_p I_p = V_s I_s$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = a \quad (6.21)$$

Contoh soal

- 1) Lampu meja sebesar 20 W dengan nilai resistansi 7,2 Ω. Daya lampu diperoleh dari sisi sekunder trafo yang sisi primernya disuplai oleh tegangan 120 Volt. Hitung a) perbandingan primer dan sekunder; b) nilai arus minimum primer.

Jawab.

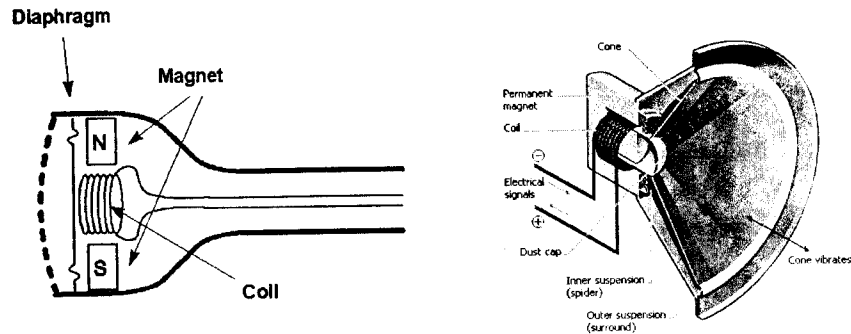
$$P = \frac{V_2^2}{R} \rightarrow V_2^2 = P \cdot R = 20 \cdot 7,2 \rightarrow V_2 = \sqrt{144} = 12 \text{ V}$$

$$\text{a) } \frac{V_1}{V_2} = \frac{120}{12} = 10 \rightarrow V_1 : V_2 = 10 : 1$$

$$\text{b) } V_2 = I_2 \cdot R \Rightarrow I_2 = \frac{12}{7,2} = 1,67 \text{ Amp}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \rightarrow I_1 = \frac{1}{10} \cdot 1,67 = 0,167 \text{ Amp}$$

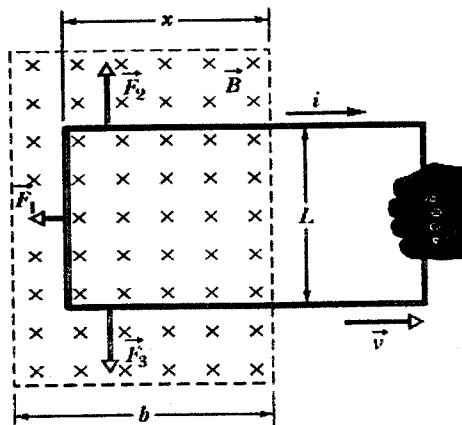
Beberapa peralatan berdasarkan prinsip tegangan induksi dapat dijumpai sehari-hari, sebagai salah satunya adalah mikropon seperti pada gambar 6.15



Gambar 6.15 Potongan gambar mikropon secara 2 dimensi dan 3 dimensi

6.6 Pembangkitan Tegangan Induksi

Bila sebuah kumparan yang berada dalam medan magnet dengan luasan permukaannya tegak lurus medan magnet, digerakkan ke kanan dengan kecepatan v seperti terlihat pada gambar 6.16 maka terjadi perubahan jumlah fluks yang dilingkupi oleh luasan sehingga akan dibangkitkan tegangan induksi sebesar:



Gambar 6.16 Tegangan induksi yang dibangkitkan oleh adanya gerakan

$$|\mathcal{E}| = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{dBA}{dt} = \frac{dBLx}{dt} = \frac{BL dx}{dt}$$

$$|\mathcal{E}| = BLv$$

(6.22)

Contoh soal 6.4

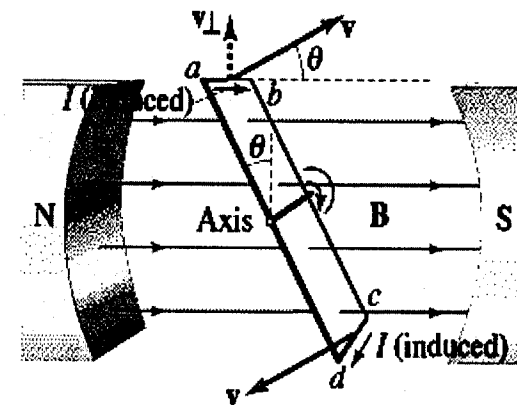
- 1) Sebuah pesawat udara bergerak dengan kecepatan 1000 km per jam dan terbang hampir tegak lurus medan magnet bumi sebesar 0,5 Gauss. Lebar bentangan sayap pesawat 70 m. Hitung tegangan yang dibangkitkan diantara kedua sayap.

Jawab: $v = 1000 \text{ km/jam} = 277,78 \text{ m/det.}$

$$\mathcal{E} = 5 \times 10^{-5} \times 70 \times 277,78 = 0,97 \text{ Volt}$$

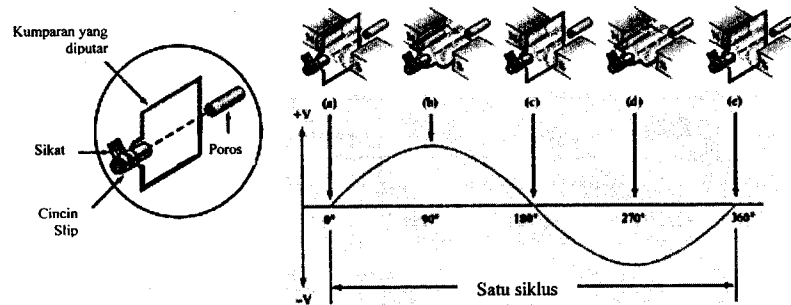
a. Prinsip Kerja Generator

Prinsip kerja generator adalah adanya kumparan yang berada dalam medan magnet diputar seperti pada gambar 6.17, maka senantiasa akan terjadi perubahan besar sudut θ sehingga terjadi perubahan fluks yang dilingkupi, dengan demikian akan dibangkitkan tegangan induksi.



Gambar 6.17 Tegangan induksi akibat kumparan yang berputar

Peristiwa ini merupakan pembangkitan tegangan/arus bolak balik yang dilakukan oleh generator dan merupakan konversi energi mekanik menjadi energi listrik. Cincin slip dan sikat membuat tersambungny aliran listrik ke penghantar yang berputar. Besar dan polaritas dari tegangan yang dibangkitkan seperti pada gambar 6.18.



Gambar 6.18 Kerja generator dan tegangan yang dibangkitkan

Terlihat bahwa tegangan yang dibangkitkan dari gambar 6.18 adalah tegangan bolak-balik berupa fungsi sinusoida.

Bila ω adalah frekuensi sudut generator dalam radian per detik dan panjang serta lebar kumparan adalah B dan A maka senantiasa terjadi fluks yang dipotong oleh kumparan yang berputar.

Besar fluks yang dipotong setiap saat sebesar:

$$\Phi = BA \cos = BA \cos \omega t \quad (6.23)$$

ω = kecepatan putar = $2\pi f$, dan

f = banyaknya putaran per detik – Hz.

Maka tegangan induksi yang dibangkitkan diperoleh sebesar,

$$|\epsilon| = N \frac{d\Phi}{dt} = NBA \frac{d\cos(\omega t)}{dt}$$

$$|\epsilon| = NBA\omega \sin(\omega t) \quad (6.24)$$

Harga tegangan maksimum: $\epsilon_{\text{maks}} = NBA\omega$

Contoh soal 6.6

- 1) Kumparan terdiri atas 25 lilitan dengan luas masing-masing $0,10 \text{ m}^2$. Diputar dengan posisi hampir tegak lurus medan magnet bumi sebesar $0,5 \text{ Gauss}$ dengan frekuensi 60 putaran per detik.

Jawab: $\epsilon = \omega NBA = 2\pi \times 60 \times 25 \times 5 \times 10^{-5} \times 0,10$

$$\epsilon = 4,7 \times 10^{-3} = 4,7 \text{ mV}$$

- 2) Sebuah generator berputar dengan kecepatan 100 rpm membangkitkan tegangan maksimum 12,4 V. Berapa tegangan maksimum bila diputar dengan kecepatan 2500 rpm.

Jawab: $\epsilon = \omega NBA$

$$F = 1000 \text{ rpm} = 16,6667 \text{ rps}$$

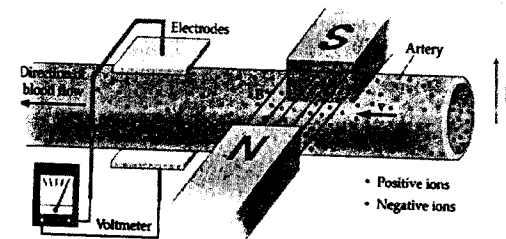
$$12,4 = 2\pi \times 16,6667 \times NBA$$

$$NBA = 0,1185$$

$$E_m = 2\pi \frac{2500}{60} 0,1185 = 31 \text{ V}$$

b. Pengukuran Laju Aliran Darah

Prinsip dasar dibangkitkannya tegangan induksi oleh adanya gerakan elektron ini diterapkan pada pengukuran laju aliran darah dalam tubuh manusia, dengan pemikiran gerakan ion dalam darah dapat berbelok akibat gaya magnet.



Gambar 6.19 Laju aliran darah diukur dengan kecepatan gerak ion-ion

Dengan gambar 6.19 dapat dilihat ion positif berbelok ke bawah sedang ion negatif berbelok ke atas. Pemisahan muatan membangkitkan medan listrik E ke arah atas sehingga terjadi beda potensial $V = Ed$ antara ke dua elektrode. Kecepatan aliran darah diukur per satuan panjang dengan

$$v = \frac{E}{B} \quad (6.25)$$

Contoh soal

- 1) Bila saluran darah yang diukur dengan panjang 2 mm berada dalam medan magnet 0,08 Tesla dan tegangan induksi yang dibangkitkan 0,1 mV Berapa kecepatan aliran darah?

Jawab:

$$\varepsilon = Blv \rightarrow v = \frac{E}{Bl} = \frac{0,1 \times 10^{-3}}{0,08 (2 \times 10^{-3})} = \underline{\underline{0,63 \text{ m/det}}}$$

6.7 Daftar Pustaka

- Boylestad, Robert, *Introductory Circuit Analysis*, Prentice Hall, Inc. 1997
- Edminister, Joseph A., *Theory and Problem Of Electric Circuit in S.I. Unit*, New York: McGraw Hill, 1972.
- Floyd, Thomas, F., *Principles of Electric Circuit*, Prentice Hall, 2000.
- Hayt Jr., William H.; Kemmerly, Jack E., *Engineering Circuit Analysis*, McGraw-Hill, Inc., 1993.
- Johnson, David E., *Basic Electric Circuit Analysis*, Prentice Hall, Inc. 1995
- Mismail, Budiono, *Dasar Teknik Elektro*, Bayu Media Publishing 2006.
- Paul, C.R., *Introduction To Electrical Engineering*, McGraw-Hill, Inc., 1992.
- Rizzoni, Giorgio., *Principles and applications of Electrical Engineering*, Third edition, McGraw-Hill, 2000
- Ryder, John D., *Electrical and Electronic Engineering*, McGraw-Hill Book Company, 1967

Smith, R. J. *Circuits, Devices and Systems*. New York: John Wiley and Sons Inc., 1972.

Soegiyardjo, S., *Dasar Teknik Elektro*, ITB, 2004

Magnetism: Examples of Magnetic Field Calculations, Innovations in Undergraduate Physics Education at Illinois @ online.physics.uiuc.edu/courses/phys112/spring04/ Lectures/Lect15.ppt, 4/17/04
PHY 2049 Chapter 31

-oo0oo-

Rangkaian Arus Bolak-Balik

Tidak seperti pada baterai yang menyediakan energi listrik secara konstan, sumber tegangan bolak-balik menyediakan tegangan yang bervariasi secara periodis terhadap waktu. Secara umum sumber tegangan yang tersedia dalam praktek sehari-hari yang dibangkitkan generator berupa fungsi sinusoida/cosinusoida yang secara periodis berulang dengan argumentasi ωt naik setiap 2π . Pada bab ini dijelaskan mengenai pembangkitan tegangan dan arus bolak-balik (*Alternating Current* = AC), analisis rangkaian dari berbagai jenis elemen. Dijelaskan juga tentang jenis-jenis daya yang terjadi pada rangkaian arus bolak-balik, adanya faktor daya, Bagian terakhir pada bab ini membahas mengenai perbaikan faktor daya.

7.1 Tegangan dan Arus Bolak-Balik

Seperti telah dijelaskan pada bab 6.4 prinsip dasar kerja generator adalah kumparan yang berputar dalam medan magnet. Dan berdasar hukum Faraday (6.23) terjadi tegangan yang dibangkitkan dari sebuah generator sebesar,

$$|\mathcal{E}| = N \frac{d\Phi}{dt} = NBA \frac{d\cos(\omega t)}{dt} = NBA\omega \sin(\omega t)$$

Frekuensi sudut $\omega = 2\pi f$ radian/detik

Frekuensi putaran $f = \frac{1}{T}$ Hertz

Persamaan di atas diterapkan untuk rangkaian bolak-balik dalam bentuk persamaan sederhana untuk tegangan sinus yang ditentukan oleh harga tegangan maksimum V_{maks} dan harga frekuensi sistem sebagai $v(t) = V_{maks} \cos \omega t$ dan $\omega = 2\pi f$.

Dengan mengingat $\sin(z) = \cos(z - 90^\circ)$, maka persamaan umum juga dapat dituliskan sebagai: $v(t) = V_{maks} \cos(\omega t + \theta_v)$

dengan $V_{maks} = NBA\omega$

$v(t)$ = harga tegangan sesaat, Volt

V_{maks} = harga tegangan maksimum, Volt

θ_v = sudut fase tegangan

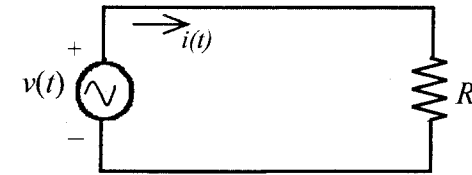
Untuk persamaan arus bolak-balik adalah juga dalam bentuk fungsi sinusoida ataupun kosinusoida, yakni $i(t) = I_{maks} \cos \omega t$

7.2 Arus Bolak-balik pada Elemen Pasif

a. Watak Resistor

Bila diketahui arus yang mengalir pada resistor: $i(t) = I_m \cos(\omega t + \phi_i)$

atau dalam bentuk fasor $I = I_m \angle \phi_i$



Gambar 7.1 Resistansi R disuplai oleh sumber tegangan bolak-balik

Berdasar hukum Ohm tegangan pada terminal resistor:

$$v(t) = R \cdot i(t)$$

$$= R \cdot I_m \cos(\omega t + \phi_i)$$

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \phi_v) \quad (7.1)$$

Beda fase antara tegangan dan arus

$$\phi_c = \phi_v - \phi_i = 0^\circ \Rightarrow \phi_v = \phi_i = \theta \quad (7.2)$$

dikatakan bahwa tegangan dan arus sefase seperti terlihat pada gambar 7.2.

Bentuk fasor tegangan $V = I R$

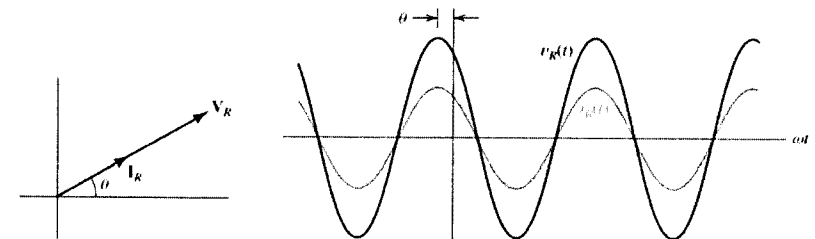
$$V = I_m \angle \phi_i R$$

$$V = I_m \cdot R \angle \theta \quad (7.3)$$

Dengan $V_m = I_m R$

Sehingga $v = V_m \cos(\omega t + \theta)$

Hukum Ohm untuk resistor pada rangkaian arus bolak-balik adalah: $V_m = I_m R$ atau $V_{ms} = I_{ms} R$



Gambar 7.2 Pada resistansi tegangan dan arus sefase

Contoh soal 7.1

- 1) Diketahui tegangan $v = 60 \sin 120\pi t$ untuk menyuplai resistor 20Ω . Berapa nilai arus yang terbaca pada amperemeter?

Jawab: $V_m = 60 \text{ V}$

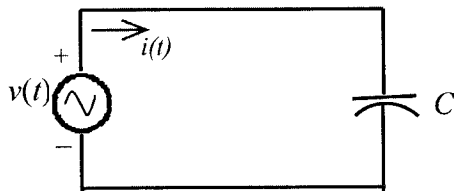
$$I_m = \frac{V}{R} = \frac{60}{20} = 3 \text{ A}$$

$$I \text{ yang terbaca pada amperemeter} = I_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 3 = 2,121 \text{ A}$$

b. Watak Kapasitor

Bila diketahui arus yang mengalir pada resistor: $i(t) = I_m \cos(\omega t + \phi_i)$

atau dalam bentuk fasor $I = I_m \angle \phi_i$



Gambar 7.3 Kapasitansi C disuplai tegangan bolak-balik

Berdasar persamaan 2.16 pada bab 2 $I = C \frac{dv}{dt}$

$$\begin{aligned} \text{Maka tegangan pada kapasitor } v(t) &= \frac{1}{C} \int i \, dt \\ &= \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t + \phi_i) \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega \omega_i + \phi_i - 90^\circ)$$

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \phi_v) \quad (7.4)$$

Bentuk fasor tegangan $V = V_m \angle \phi_v$

dengan $\phi_v - \phi_i = 90^\circ$, artinya tegangan tertinggal dari arus sebesar 90° .

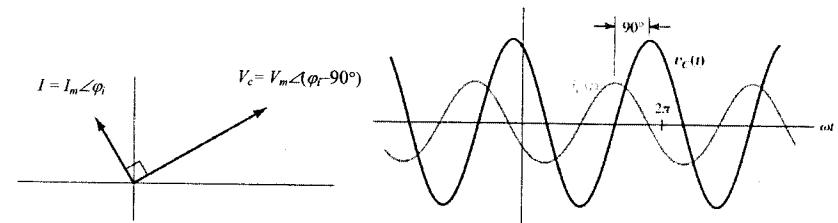
$$\text{Sudut fase antara arus dan tegangan } \theta = \phi_v - \phi_i = 90^\circ \quad (7.5)$$

Harga v akan maksimum saat $\cos(\omega t + \phi_v) = 1$, dan $V_m = I_m \frac{1}{\omega C}$

Bentuk tegangan pada kapasitor dalam fasor dapat ditulis sebagai,

$$V = \frac{1}{j\omega C} \cdot I = -jX_C \cdot I \quad (7.6)$$

$$-jX_C = \frac{1}{j\omega C} = \text{reaktansi kapasitif } -\Omega \quad (7.7)$$



Gambar 7.4 Pada kapasitor tegangan tertinggal (lagging) dari arus -90°

Contoh soal 7.2

- 1) Sebuah kapasitor $25 \mu\text{F}$ dipasang pada frekuensi 15 kHz . Berapa: a) nilai reaktansi kapasitif; b) besar tegangan maksimum pada kapasitor bila arus yang lewat $5,8 \text{ mA}$ c) Fasor tegangan pada kapasitor

Jawab:

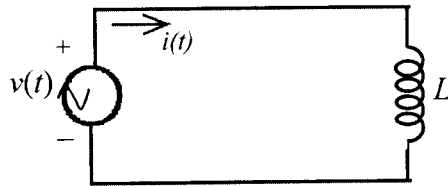
$$a) \quad X_C = -j \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 10^{-6}} = -j0,42 \, \Omega$$

b) Dengan arus sebagai acuan: $5,8 \angle 0^\circ$ mA, maka

$$V = -j0,42 \times 5,8 \cdot 10^{-3} \angle 0^\circ = 2,4 \text{ V} \angle (-90^\circ + 0^\circ) = 2,4 \angle -90^\circ \text{ V}$$

c. Watak Induktor

Bila diketahui arus yang mengalir pada resistor: $i(t) = I_m \cos(\omega t + \Phi_i)$



Gambar 7.5 Rangkaian arus bolak-balik pada induktor

$$\begin{aligned} \text{Tegangan pada induktor: } V(t) &= L \cdot \frac{di}{dt} \\ &= -\omega L \cdot I_m \sin(\omega t + \Phi_i) \\ &= \omega L \cdot I_m \cos(\omega t + \Phi_i + 90^\circ) \\ V(t) &= V_m \cos(\omega t + \Phi_v) \end{aligned} \quad (7.8)$$

$$\text{Bentuk fasor tegangan } V = V_m \angle \Phi_v \quad (7.9)$$

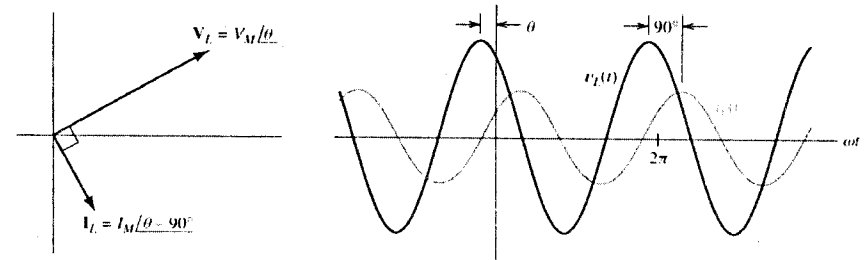
dengan $\Phi_v - \Phi_i = 90^\circ$, artinya tegangan mendahului dari arus sebesar 90° .

Beda fase antara arus dan tegangan.

Bentuk tegangan pada induktor dalam fasor dapat ditulis sebagai,

$$V = j\omega \cdot I = jX_L \cdot I \quad (7.10)$$

$$jX_L = j\omega L = \text{reaktansi induktif} - \Omega \quad (7.11)$$



(a) Diagram fasor

(b) Dalam kawasan waktu

Gambar 7.6 Pada induktor tegangan mendahului (leading) arus $+90^\circ$

Contoh soal 7.2

- 1) Sebuah induktor 2 mH disuplai oleh tegangan 15V pada frekuensi 100 Hz. Berapa nilai arus yang lewat.

Jawab: Tegangan 15 V = V_{RMS}

$$X_L = \omega L = 2\pi \cdot 100 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 1,256 \, \Omega$$

$$I = \frac{15}{1,256} = 11,9 \text{ A}$$

Dengan menetapkan tegangan sebagai acuan, terlihat bahwa sudut fase antara tegangan dan arus adalah:

- 0° untuk resistor
- $+90^\circ$ untuk kapasitor
- -90° untuk induktor

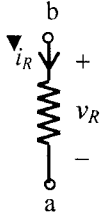
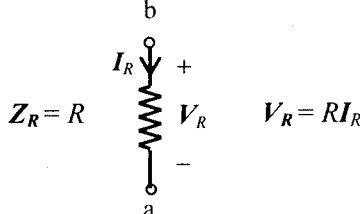
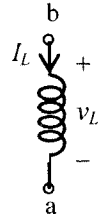
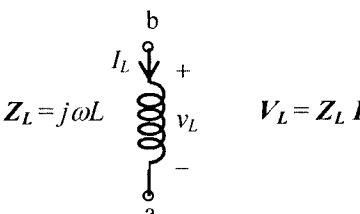
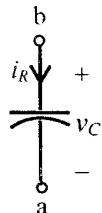
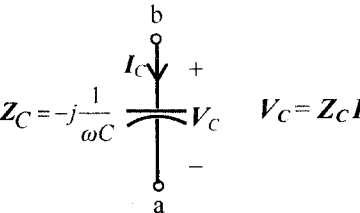
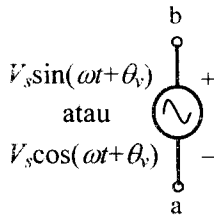
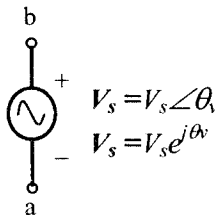
Akronim yang tepat untuk hubungan tegangan dan arus ini adalah **CIVIL**, dengan pengertian

CIV** untuk kapasitor, arus (I) mendahului tegangan (V) sebesar 90° dan $\theta = 90^\circ$

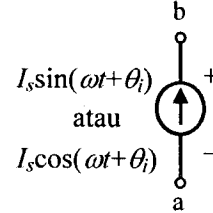
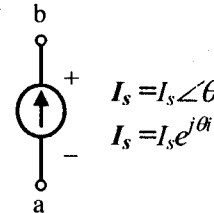
****VIL** untuk induktor, tegangan (V) mendahului arus (I) sebesar 90° dan $\theta = -90^\circ$

Untuk memudahkan mengingat transformasi dari bentuk waktu ke bentuk fasor dapat dilihat pada tabel 7.1

Tabel 7.1 Hubungan rangkaian dalam bentuk frekuensi dan fasor

Dalam kawasan frekwensi	Dalam bentuk fasor
	
	
	
	

Tabel 7.1 Lanjutan

	
---	---

Contoh soal 7.3

- 4) Diketahui arus $i = 5 \cos 100t$ Amp. Berapa tegangan pada a) $R = 10 \Omega$; b) $L = 10 \text{ mH}$ dan c) $C = 1 \text{ mF}$

Jawab: Fasor $I = 5 \angle 0^\circ$ Amp., $\omega = 100$ R = 10Ω

- a) $V = 5 \angle 0^\circ \times 10 = 50 \angle 0^\circ$ Volt.

$$v = 50 \cos (100t + 0^\circ)$$

- b) $L = 10 \text{ mH}$

$$X_L = 100 \times 10 \times 10^{-3} = 1 \Omega$$

$$V = I j X_L = 5 \angle 0^\circ \cdot 1 \angle 90^\circ = 5 \angle 90^\circ \text{ Volt}$$

$$\text{Jadi } v = 5 \cos (100t + 90^\circ)$$

- c) $C = 1 \text{ mF}$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{100 \times 1 \times 10^{-3}} = 10 \Omega$$

$$V = I \cdot -jX_L = 5 \angle 0^\circ \cdot 1 \angle -90^\circ = 5 \angle -90^\circ \text{ Volt}$$

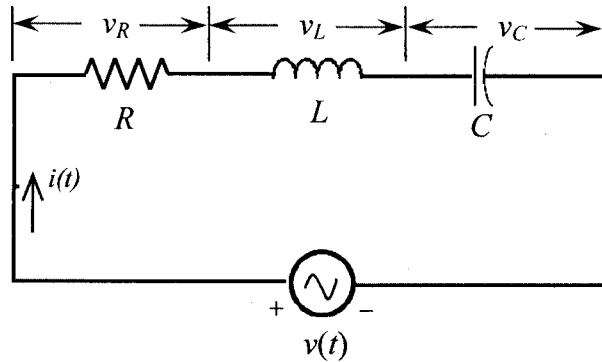
$$v = 50 \cos (100t - 90^\circ)$$

7.3 Impedansi dan Admitansi

a. Impedansi

Resistor, induktor dan kapasitor dapat dirangkai sebagai hubungan seri seperti terlihat pada gambar 7.7. Dalam hal ini arus yang lewat

rangkaian pada masing-masing elemen setiap saat akan bernilai sama dan berubah dalam bentuk fungsi sinusoida terhadap waktu.



Gambar 7.7 Hubungan seri resistansi, induktansi, dan kapasitansi

Bila diketahui arus yang mengalir $i(t) = I_m \cos(\omega t + \Phi_i)$

Tegangan sumber dapat dihitung dengan $v(t) = v_R + v_L + v_C$

Dalam bentuk fasor diperoleh

$$V = R.I + jX_L.I - jX_C.I$$

$$V = I(R + jX_L - jX_C) \quad (7.12)$$

$$V = IZ \quad (7.13)$$

Z adalah impedansi dengan satuan Ohm

Sehingga impedansi

$$Z = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) \quad (7.14)$$

$$\text{Besar impedansi } Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

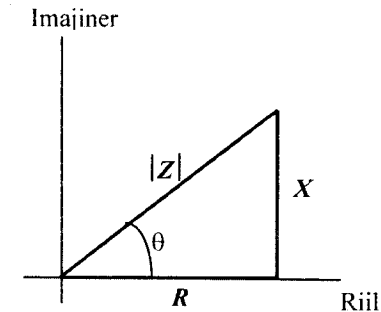
$$\text{atau } Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \quad (7.15)$$

Akan terbentuk sudut θ yang merupakan beda fase antara tegangan dan arus yang besarnya dapat dihitung dengan,

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R} \quad (7.16)$$

$$X = X_L - X_C \quad (7.17)$$

Hubungan resistansi, reaktansi serta impedansi dapat digambarkan dalam bentuk segitiga seperti pada gambar 7.8.



Gambar 7.8 Segitiga impedansi, reaktansi, dan resistansi

Contoh soal 7.4

- 1) Bila resistansi $R = 200\Omega$ dihubungkan seri dengan induktansi $L = 20 \text{ mH}$ dan disuplai pada frekuensi 600 Hz . Hitung nilai impedansinya!

$$\text{Jawab: } X_L = \omega L = 2\pi 600 20 \cdot 10^{-3} = 75,36\Omega$$

$$Z = R + jX_L = (200 + j75,36)\Omega$$

- 2) Bila resistansi $R = 200\Omega$ dihubungkan seri dengan kapasitansi $C = 200 \mu\text{F}$ dan disuplai pada frekuensi 100 MHz . Hitung nilai impedansinya.

$$\text{Jawab: } X_C = 1/\omega C = 1/(2\pi 100 \cdot 10^6 200 \cdot 10^{-6}) = 125,6\Omega$$

$$Z = R + jX_L = (200 + j125,6)\Omega$$

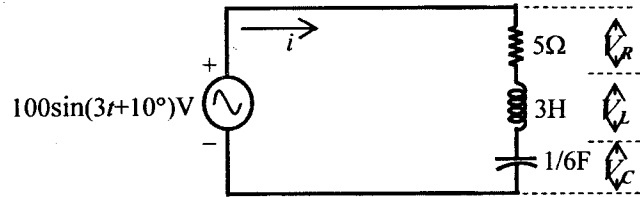
- 3) Sebuah impedansi dengan nilai $Z = 100\angle -80^\circ$ terdiri atas resistansi dan kapasitansi. Tetapkan nilai R dan C bila sistem bekerja dengan frekuensi 5000 Hz

$$\begin{aligned}\text{Jawab: } Z &= 100\angle -80^\circ = 100 \cos(-80^\circ) + j100 \sin(-80^\circ) \\ &= 17,365 - j98,48\end{aligned}$$

Maka $R = 17,365 \, \Omega$ dan

$$\frac{1}{\omega C} = 98,48 \rightarrow C = \frac{1}{2\pi 5000 98,48} = 0,00162 = 1,62 \, \text{mF}$$

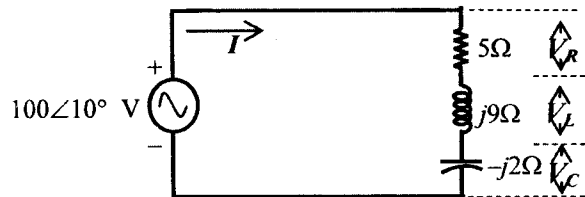
- 4) Dari rangkaian pada Gambar 7.9 hitung a) impedansi rangkaian; b) nilai arus yang mengalir; c) tegangan pada resistor, induktor dan kapasitor!



Gambar 7.9 Rangkaian untuk contoh soal 8

Jawab: $\omega = 3 \text{ rad/det}$ dengan $\theta_v = 10^\circ$
 $V_m = 100 \, \text{V}$
 $X_R = 5\Omega$
 $X_L = \omega L = 3 \cdot 3 = 9\Omega$

Rangkaian digambarkan lagi dalam fasor seperti pada gambar 7.11.



Gambar 7.10 Rangkaian gambar 7.10 dalam fasor

Dengan demikian dapat dicari impedansinya:

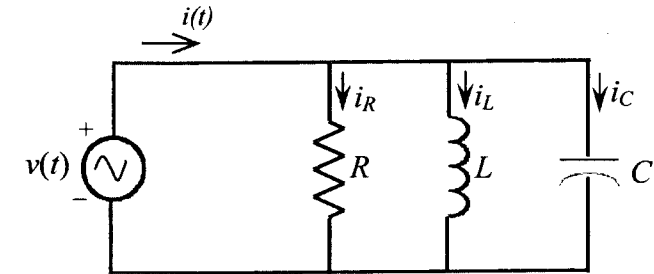
$$\begin{aligned}Z &= 5 + j9 - j2 = 5 + j7 \\ &= 8,6\angle 54,46^\circ\end{aligned}$$

$$\text{a) Arus yang lewat: } I = \frac{V}{Z} = \frac{100\angle 10^\circ}{8,6\angle 54,46^\circ} = 11,62\angle -44,46^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned}\text{b) } V_R &= Z_R \cdot I = 5 \cdot 11,67\angle -44,46^\circ = 58,35\angle -44,46^\circ \\ V_L &= Z_L \cdot I = j9 \cdot 11,67\angle -44,46^\circ = 9\angle 90^\circ \cdot 11,67\angle -44,46^\circ \\ &= 105,03\angle -45,54^\circ \\ V_R &= Z_R \cdot I = -j2 \cdot 11,67\angle -44,46^\circ = 2\angle -90^\circ \cdot 11,67\angle -44,46^\circ \\ &= 23,34\angle -134,46^\circ\end{aligned}$$

b. Admitansi

Bila resistansi, induktansi dan kapasitansi dihubungkan secara paralel maka tegangan pada setiap elemen sama. Lihat pada gambar 7.11.



Gambar 7.11 Hubungan paralel resistansi, induktansi, dan kapasitansi

Arus total dari rangkaian paralel pada gambar 7.9 merupakan jumlah dari ketiga arus cabang.

$$\begin{aligned}I_{\text{total}} &= I_R + I_L + I_C \\ I &= \frac{V}{R} + \frac{V}{jX_L} + \frac{V}{-jX_C}\end{aligned}$$

$$\text{Selanjutnya dapat juga dituliskan dengan } I = VY_R + VY_L + VY_C$$

Y disebut sebagai admitansi dengan satuan Siemens atau disingkat Si. Hubungan impedansi dan admitansi. Harga admitansi untuk elemen-elemen resistansi induktansi dan kapasitansi sebagai berikut,

$$Y_R = \frac{1}{R} \quad (7.18)$$

$$Y_L = \frac{1}{jX_L} = -j\frac{1}{\omega L} \quad (7.19)$$

$$Y_C = \frac{1}{-jX_C} = j\omega C \quad (7.20)$$

$$Y = Y_R + Y_L + Y_C \quad (7.21)$$

$$Y_R = \frac{1}{R} + j\left(-\frac{1}{\omega L} + \omega C\right) \quad (7.22)$$

$$Y = G + jB \quad (7.23)$$

Dengan Y = admitansi-Siemen

G = Konduktansi

B = susceptansi

Contoh soal 7.5

- 1) Bila resistansi 5Ω diparalel dengan induktansi 20mH dengan suplai pada frekwensi 60Hz . Berapa nilai admitansinya.

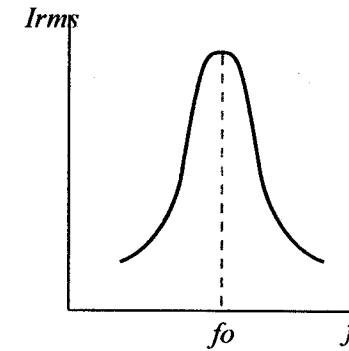
$$\text{Jawab: } G = \frac{1}{R} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ Si}$$

$$B = -j\frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}$$

$$Y = 0,2 - j0,133$$

7.4 Resonansi

Resonansi terjadi pada frekuensi f_o , yakni pada saat nilai arus maksimum. Untuk mencapai harga arus maksimum maka impedansi harus bernilai minimum, dan ini terjadi bila $X_L = X_C$. Hubungan arus dan frekuensi saat resonansi terlihat pada gambar 7.12.



Gambar 7.12 Hubungan frekuensi dan I_{rms} saat terjadi resonansi

Harga I_{rms} dapat dihitung dari, $G_{rms} = \frac{V_{rms}}{Z}$

Harga frekuensi resonansi diperoleh $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (7.24)

Contoh soal 7.6

- 1) Sebuah radio dengan rangkaian tuning yakni induktansi sebesar $150\mu\text{H}$ dengan kapasitansi yang dapat diubah-ubah nilainya sebesar 169 pF . Berapa frekuensi resonansinya?

Jawab:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2,314 \cdot \sqrt{150 \cdot 10^{-3} \cdot 169 \cdot 10^{-12}}} = 1000 \text{ kHz}$$

7.5 Daya Arus Bolak Balik dan Faktor Daya

Bila dalam sebuah rangkaian mengalir arus $i(t) = I_m \cos(\omega t + \Phi_i)$ dan disuplai oleh tegangan $v(t) = V_m \cos(\omega t + \Phi_v)$, dalam hal ini Φ_i adalah sudut fase arus dan Φ_v adalah sudut fase tegangan. Maka daya sesaat yang berubah terhadap waktu pada rangkaian dapat dihitung dengan:

$$p(t) = v(t) i(t) \text{ atau}$$

$$p(t) = V_m \cos(\omega t + \Phi_v) I_m \cos(\omega t + \Phi_i)$$

$$p(t) = \frac{V_m I_m}{2} \{ \cos(2\omega t + \Phi_v + \Phi_i) + \cos(\Phi_v - \Phi_i) \}$$

$$p(t) = \frac{V_m I_m}{\sqrt{2} \sqrt{2}} \{ \cos(2\omega t + \Phi_v + \Phi_i) + \cos(\Phi_v - \Phi_i) \}$$

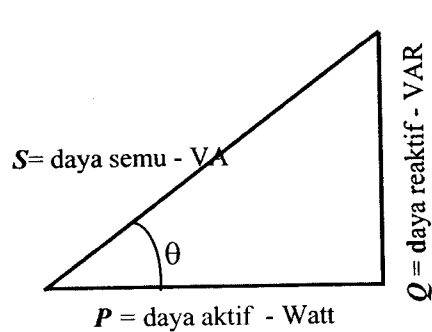
Bila diambil nilai rata-ratanya maka $\cos(2\omega t + \Phi_v + \Phi_i) = 0$ sehingga besar daya rata-rata adalah:

$$P_{rata-rata} = \frac{V_m I_m}{\sqrt{2} \sqrt{2}} \cos \Phi - \text{Watt} \quad (7.25)$$

$$P_{rata-rata} = V_{rms} I_{rms} \cos \Phi - \text{Watt} \quad (7.26)$$

Dengan nilai Φ yang merupakan beda fase antara tegangan dan arus.

Dengan adanya faktor $\cos \Phi$, maka akan dapat dibuat sebuah segitiga daya seperti terlihat pada gambar 7.13.



Gambar 7.13 Segitiga Daya pada Arus Bolak-balik

Pada daya rata-rata terjadi faktor $\cos \Phi$ yang disebut juga dengan faktor daya (*Power Factor* = $p.f$) maka, $p.f = \cos \Phi$

Daya aktif P merupakan daya yang dimanfaatkan.

Daya reaktif Q adalah daya yang hilang.

Daya rata-rata disebut juga dengan daya aktif dan merupakan daya yang dimanfaatkan antara lain penerangan, pemanas dan memutar objek, terukur dengan satuan Watt.

Daya yang diperhitungkan berdasar nilai $\sin \Phi$ adalah daya reaktif dengan simbol Q merupakan daya yang tidak dapat dimanfaatkan sehingga nilainya akan mempengaruhi kualitas daya, terukur dengan satuan VAR.

Bentuk daya yang merupakan sisi miring segitiga adalah daya semu dengan simbol S , terukur dengan satuan VA. Ketiga daya ini disusun sebagai Segitiga daya, lihat gambar 7.13. Persamaan-persamaan daya dapat dituliskan,

$$Q = \frac{V_m I_m}{\sqrt{2} \sqrt{2}} \sin \Phi - \text{VAR} \quad (7.27)$$

$$Q = V_{rms} I_{rms} \sin \Phi - \text{VAR} \quad (7.28)$$

$$Q = V_{rms} I_{rms} - \text{VA} \quad (7.29)$$

a. Daya Pada Rangkaian Resistor

Dari watak resistor pada arus bolak-balik yang telah dipelajari di atas bila persamaan tegangan adalah, $v(t) = V_m \cos(\omega t + \Phi_v)$ dan

$$\text{arus } i(t) = I_m \cos(\omega t + \Phi_i) \text{ dan}$$

tegangan se fase dengan arus sehingga $\Phi_v = \Phi_i$ atau $\Phi_v - \Phi_i = 0$ maka

$$P_{rata-rata} = V_{rms} I_{rms} \cos 0^\circ$$

$$P_{rata-rata} = V_{rms} I_{rms}$$

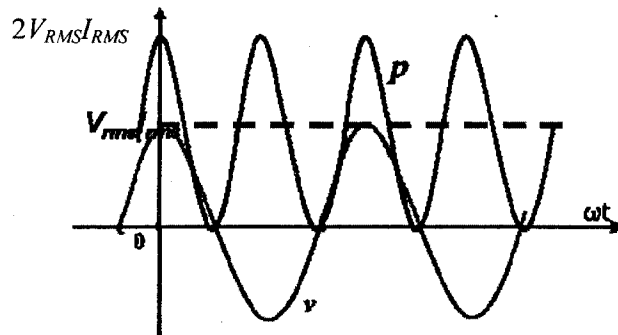
Dalam bentuk fasor,

$$\begin{aligned} V &= V_m \angle \Phi_v & P_{rata-rata} &= \frac{V_m I_m}{\sqrt{2} \sqrt{2}} \cos \Phi - \text{Watt} \\ I &= I_m \angle \Phi_i & \Phi &= \Phi_v - \Phi_i = 0 \\ & & P_{rata-rata} &= \frac{V_m I_m}{2} \cos 0^\circ - \text{Watt} \\ & & P_{rata-rata} &= \frac{V_m I_m}{\sqrt{2} \sqrt{2}} = V_{rms} \cdot I_{rms} - \text{Watt} \end{aligned}$$

Gambar 7.14 Tegangan dan arus bolak-balik pada resistansi

$$\text{Sehingga } p_{\text{rata-rata}} = \frac{1}{2} I_{\text{maks}}^2 R^2 = I_{\text{rms}}^2 R^2 \quad (7.30)$$

$$p_{\text{rata-rata}} = \frac{1}{2} \frac{V_{\text{maks}}}{R^2} = \frac{V_{\text{rms}}}{R^2} \quad (7.31)$$



Gambar 7.15 Daya pada resistor

b. Daya Pada Rangkaian Kapasitor

Dari watak kapasitor pada arus bolak-balik, bila persamaan tegangan adalah $v(t) = V_m \cos(\omega t + \phi_v)$ dan

arus $i(t) = I_m \cos(\omega t + \phi_i)$ dan

tegangan berbeda fase dengan arus sebesar -90° sehingga

$\phi_v - \phi_i = -90^\circ$ maka

$$P_{\text{rata-rata}} = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \cos -90^\circ = 0$$

$$Q = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \sin -90^\circ = -V_{\text{rms}} I_{\text{rms}}$$

Dalam bentuk fasor,

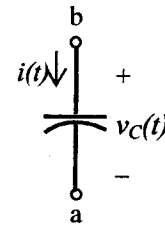
$$V = V_m \angle \phi_v \quad Q = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sin \phi - \text{VAR}$$

$$I = I_m \angle \phi_i$$

$$\phi = \phi_v - \phi_i = -90^\circ$$

$$Q = \frac{V_m I_m}{2} \sin -90^\circ - \text{VAR}$$

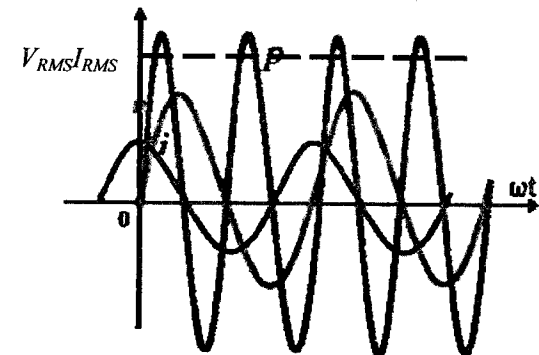
$$Q = -\frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}} = -V_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} - \text{VAR}$$



$$\text{Sehingga } Q = -\frac{1}{2} I_{\text{maks}}^2 X_C^2 = -I_{\text{rms}}^2 X_C^2 \quad (7.32)$$

$$Q = -\frac{1}{2} \frac{V_{\text{maks}}}{X_C^2} = \frac{V_{\text{rms}}}{X_C^2} \quad (7.33)$$

Gambar 7.16 Tegangan dan arus bolak-balik pada kapasistansi



Gambar 7.17 Daya pada kapasitor

c. Daya Pada Rangkaian Induktor

Dari watak induktor pada arus bolak-balik yang telah dipelajari di atas bila persamaan tegangan $v(t) = V_m \cos(\omega t + \phi_v)$ dan

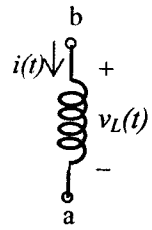
arus $i(t) = I_m \cos(\omega t + \phi_i)$ dan

tegangan berbeda fase dengan arus sebesar 90° sehingga $\phi_v - \phi_i = 90^\circ$ maka

Dalam bentuk fasor,

$$V = V_m \angle \phi_v$$

$$I = I_m \angle \phi_i$$



Gambar 7.18 Tegangan dan arus bolak-balik pada induktansi

$$Q = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sin \phi - \text{VAR}$$

$$\phi = \phi_v - \phi_i = 90^\circ$$

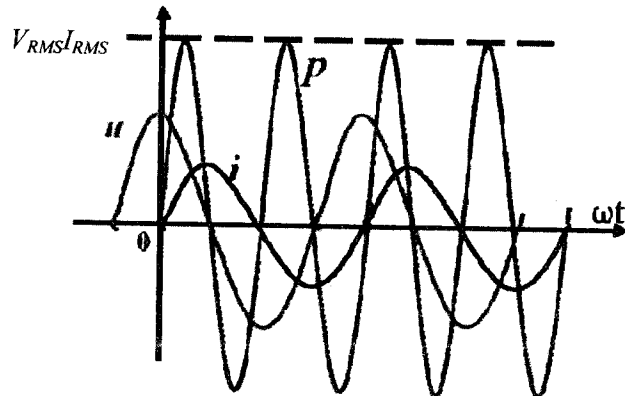
$$Q = \frac{V_m I_m}{2} \cos 90^\circ - \text{VAR}$$

$$Q = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}} = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} - \text{VAR}$$

Sehingga

$$Q = -\frac{1}{2} I_{\text{maks}}^2 X_L = -I_{\text{rms}}^2 X_L \quad (7.34)$$

$$Q = -\frac{1}{2} \frac{V_{\text{maks}}^2}{X_L^2} = -\frac{V_{\text{rms}}^2}{X_L^2} \quad (7.35)$$



Gambar 7.19 Daya pada induktor

Contoh soal 7.6

- 1) Dari contoh soal no. 8 hitung; a) daya rata-rata, daya reaktif dan daya semu serta b) faktor daya (pf) pada rangkaian.

Jawab:

Berdasar penyelesaian dari contoh soal no 8 gambar 7.10 diperoleh

Nilai impedansi $Z = 5 + j7 = 8,6 \angle 54,46^\circ$

Arus yang lewat: $I = 11,67 \angle -44,46^\circ$

Tegangan sumber = $100 \angle 10^\circ$

Jadi $\theta = \theta_v - \theta_i = 10^\circ - (-44,46^\circ) = 54,46^\circ$

a) Daya rata-rata $P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos \theta = \frac{1}{2} 100 \cdot 11,62 \cos 54,46^\circ = 337,72 \text{ W}$

Daya reaktif $Q = \frac{1}{2} V_m I_m \sin \theta = \frac{1}{2} 100 \cdot 11,62 \sin 54,46^\circ = 472,77 \text{ VAR}$

Daya semu $S = \frac{1}{2} V_m I_m = \frac{1}{2} 100 \cdot 11,62 = 581 \text{ VA}$

Cara lain:

Daya rata-rata $P = \frac{1}{2} I_m^2 R = \frac{1}{2} (11,62)^2 \cdot 5 = 337,56 \text{ W}$

Daya reaktif $Q = \frac{1}{2} I_m^2 X = \frac{1}{2} (11,62)^2 \cdot 7 = 472,59 \text{ VAR}$

Daya semu $S = \frac{1}{2} I_m^2 Z = \frac{1}{2} (11,62)^2 \cdot 8,6 = 580,60 \text{ VA}$

b) Faktor daya (pf) = $\cos 54,46^\circ = 0,58$

- 2) Bila diketahui $v(t) = 100 \cos(5t + 40^\circ)$ Volt dan $i(t) = 20 \cos(5t + 10^\circ)$. Hitung daya rata-rata, daya reaktif dan daya semu.

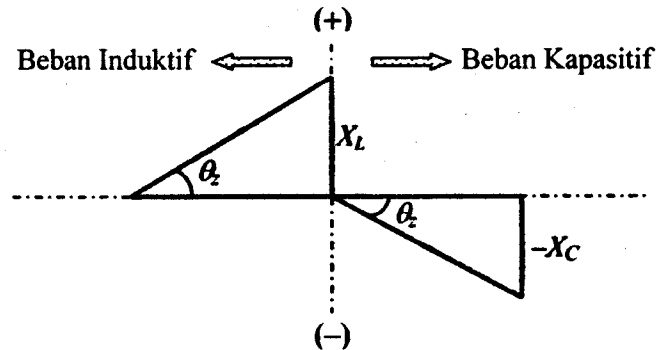
Jawab: $P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos (\theta_v - \theta_i) = \frac{1}{2} 100 \cdot 20 \cdot \cos (40^\circ - 10^\circ) = 86,60 \text{ W}$

- d. Jenis-Jenis Beban

Berdasarkan harga reaktansi total dan nilai faktor daya beban maka beban dibedakan atas, dapat juga dilihat berdasar gambar 7.21 :

- a) Beban resistif dengan ciri-ciri: nilai $X_{\text{total}} = 0$ dan faktor daya = 1. Beban ini hanya terdiri atas resistansi saja, misal bola-bola lampu, seterika dan pemanas.

- b) Beban induktif dengan ciri-ciri X_{total} positif atau $X_L > X_C$ dan θ_z positif disebut faktor daya tertinggal (*lagging*). Arus tertinggal dari tegangan
- c) Beban kapasitif dengan ciri-ciri X_{total} negatif $X_L < X_C$ dan θ_z negatif disebut faktor daya mendahului (*leading*). Arus mendahului tegangan



Gambar 7.20 Ciri-ciri jenis beban berdasar nilai X dan θ_z .

e. Perbaikan Faktor Daya

Berhubung daya reaktif Q adalah daya yang hilang maka diharapkan daya rata-rata P bernilai besar dan harga Q sekecil mungkin. Idealnya nilai faktor daya mendekati 1 atau $\cos \theta_z$ atau jenis beban resistif. Hal ini sulit dilakukan karena pada kenyataannya di industri terdapat banyak motor-motor listrik sebagai penggerak peralatan produksi. Motor listrik adalah gambaran adanya nilai-nilai X_L . Dengan demikian harga Q menjadi besar ($X_L > X_C$).

Sebagai contoh adalah kasus sebagai berikut,

Sebuah pembangkit menyuplai beban dengan kapasitas tegangan RMS 220V dan arus RMS 150 A.

- a. Instalasi Gedung A, dibebani dengan beban resistif, $pf = 1 \Rightarrow \cos \theta_z = 1, \Rightarrow \theta_z = 0^\circ$ maka:

$$\text{Harga } S = 150 \cdot 220 = 33 \text{ kVA}$$

$$\text{Harga } P = 150 \cdot 220 \cos \theta_z = 1 \Rightarrow P = 33 \text{ kW}$$

$$\text{Harga } Q = 150 \cdot 220 \sin \theta_z = 0 \Rightarrow Q = 0$$

- b. Instalasi Pabrik B, dibebani dengan faktor daya = 0,8 $\Rightarrow \theta_z = 36,87^\circ$ maka:

$$\text{Harga } S = 150 \cdot 220 = 33 \text{ kVA}$$

$$\text{Harga } P = 150 \cdot 220 \cos 36,87^\circ \Rightarrow P = 26,4 \text{ kW}$$

$$\text{Harga } Q = 150 \cdot 220 \sin 36,87^\circ \Rightarrow Q = 19,8 \text{ kVAR}$$

- c. Instalasi Pabrik B, dibebani dengan faktor daya = 0,6 $\Rightarrow \theta_z = 53,13^\circ$ maka:

$$\text{Harga } S = 150 \cdot 220 = 33 \text{ kVA}$$

$$\text{Harga } P = 150 \cdot 220 \cos 53,13^\circ \Rightarrow P = 19,8 \text{ kW}$$

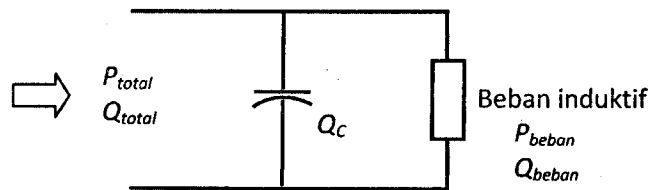
$$\text{Harga } Q = 150 \cdot 220 \sin 53,13^\circ \Rightarrow Q = 26,4 \text{ kVAR}$$

Dari contoh kasus di atas terlihat bila faktor daya makin kecil atau θ_z makin besar akan makin banyak daya yang hilang dibanding daya yang dimanfaatkan. Atau makin besar nilai VAR dibanding Watt. Hal ini merugikan baik bagi pengguna instalasi maupun bagi pihak pembangkit pemberi daya.

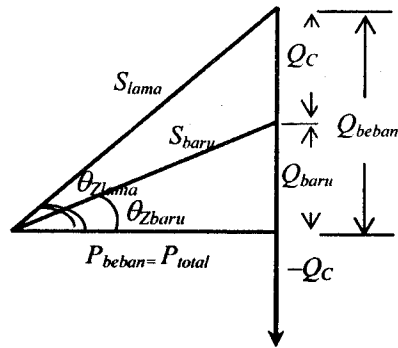
Untuk di Indonesia ditetapkan aturan untuk harga faktor daya sebesar:

$$0,8 \leq \cos \theta_z \leq 1$$

Untuk instalasi dengan nilai VAR tinggi dapat dikoreksi dengan cara memasang kapasitor atau generator sinkron secara paralel dengan instalasi. Mengingat kapasitor atau generator sinkron mempunyai nilai X negatif. Pemasangan kapasitor dapat digambarkan pada gambar 7.21 dan analisis daya dengan adanya kapasitor pada gambar 7.22.



Gambar 7.21 Pemasangan kapasitor paralel



Gambar 7.22 Analisis daya dengan adanya kapasitor paralel

$$\begin{aligned} P_{total} &= P_{beban} + P_C \\ &= P_{beban} + 0 \end{aligned} \quad \cos \theta_z \Big|_{lama} = \frac{P_{beban}}{S_{lama}} \quad (7.36)$$

$$Q_{total} = Q_{beban} - Q_C \quad \cos \theta_z \Big|_{baru} = \frac{P_{beban}}{S_{baru}} \quad (7.37)$$

Nilai daya pada kapasitor paralel $-Q_C = \frac{V^2}{-X_C} \Rightarrow X_C = \frac{V^2}{Q_C}$ (7.38)

Mencari nilai kapasitansi: $X_C = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow C = \frac{1}{2\pi f X_C}$ (7.39)

Contoh soal 7.7

- 1) Dari contoh soal no. 11 bila diinginkan faktor daya sistem dinaikkan = 0,96. Berapa nilai C yang harus dipasang dengan frekuensi sistem 60 Hz.

Jawab: Dari jawaban soal no 11 diperoleh:

Tegangan sumber = $100 \angle 10^\circ$

Jadi $\theta = \theta_v - \theta_i = 10^\circ - (-44,46^\circ) = 54,46^\circ$

Daya rata-rata $P_{total} = P_{beban} = 337,72W$

Daya reaktif $Q_{lama} = 472,77 VAR$

Faktor daya (pf) = $\cos 54,46^\circ = 0,58 \Rightarrow \theta_z \Big|_{lama} = 54,46^\circ$

$\Rightarrow \theta_z \Big|_{baru} = \arccos(0,96) = 16,26^\circ$

$$\cos \theta_z \Big|_{baru} = \frac{P_{beban}}{S_{baru}}$$

$$0,96 = \frac{337,72}{S_{baru}} \Rightarrow S_{baru} = 393,46$$

$$S_{baru} = \sqrt{P^2 + Q_{baru}^2}$$

$$Q_{baru} = \sqrt{S_{baru}^2 - P^2} = \sqrt{(393,46)^2 - (337,72)^2}$$

$$Q_{baru} = 201,88 \text{ kVAR}$$

$$X_C = \frac{V^2}{Q_{Cbaru}} = \frac{100^2}{201,88} = 49,53 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2.3,14.60.49,53} = 53,58 \mu F$$

7.6 Daftar Pustaka

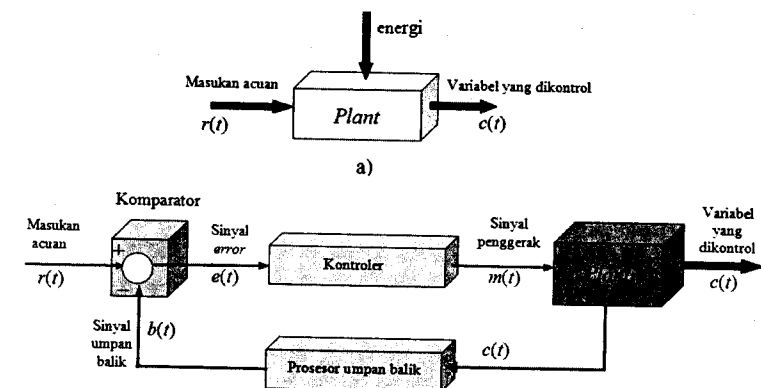
- Boylestad, Robert, *Introductory Circuit Analysis*, Prentice Hall, Inc. 1997
- Edminister, Joseph A., *Theory and Problem Of Electric Circuit in S.I. Unit*, New York: McGraw Hill, 1972.
- Floyd, Thomas, F., *Principles of Electric Circuit*, Prentice Hall, 2000.
- Hayt Jr., William H.; Kemmerly, Jack E., *Engineering Circuit Analysis*, McGraw-Hill, Inc., 1993.
- Johnson, David E., *Basic Electric Circuit Analysis*, Prentice Hall, Inc. 1995
- Paul, C.R., *Introduction To Electrical Engineering*, McGraw-Hill, Inc., 1992.
- Rizzoni, Giorgio., *Principles and applications of Electrical Engineering*, Third edition, McGraw-Hill, 2000
- Ryder, John D., *Electrical and Electronic Engineering*, McGraw-Hill Book Company, 1967
- Smith, R. J. *Circuits, Devices and Systems*. New York: John Wiley and Sons Inc., 1972.
- Allan R Hambley, *Electrical Engineering Principles and application*, Prentice Hall Inc 2002, Chapter 5 Steady State sinusoidal Analysis
- Floyd, *Electric Circuits Fundamental*, Prentice Hall, 2007
- Allan H Robbins & Wilhelm, *Circuits Analysis: Theory & Practice*, Thomson 2003

-oo0oo-

BAB VIII

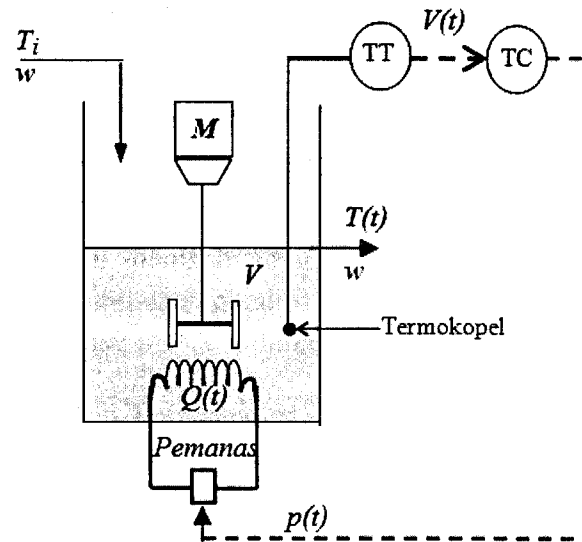
Pengantar Sistem Kontrol

Untuk memperoleh hasil yang maksimal dengan kinerja yang baik dari sebuah proses perlu dipahami dan dapat dianalisis dengan baik proses tersebut. Terlebih lagi bila diinginkan untuk dapat mengendalikan atau mengontrol sistem yang bekerja. Dengan demikian proses yang ada harus dapat dievaluasi dengan mengenali watak sistem. Dikenal dua model sistem, yakni sistem terbuka dan sistem tertutup seperti pada gambar 8.1.



Gambar 8.1 a) Sistem dengan lob terbuka b) Sistem dengan lop tertutup

Sistem dengan loop terbuka adalah sebuah sistem kontrol sederhana tanpa memperhatikan kondisi awal ataupun masukan dari luar, keluaran yang ada tidak dibandingkan dengan masukan dan perlu dimonitor. Contoh menutup pintu, atau memasak air. Untuk sistem loop tertutup atau sistem dengan umpan balik menggunakan keluaran proses dan digunakan untuk memodifikasi proses agar diperoleh hasil yang diinginkan, sistem ini secara kontinu mengendalikan proses. Contoh kontrol suhu saat untuk tangki pengaduk dan pemanas, seperti pada gambar 8.2.



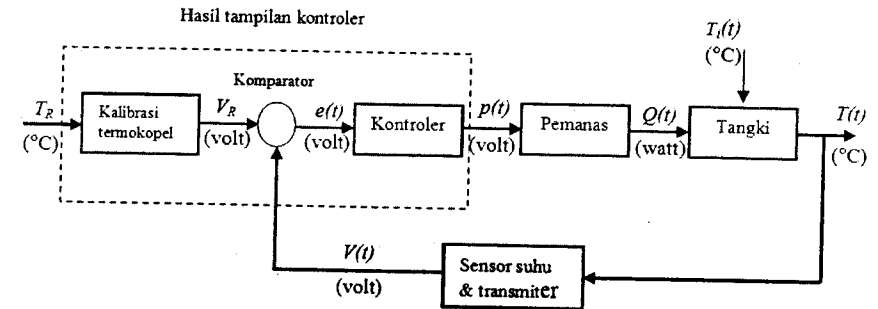
Gambar 8.2 Proses kontrol suhu tangki pengaduk

TT: suhu transmitter

TC: suhu kontroler

Garis putus-putus adalah sinyal listrik

Berdasar skema diagram gambar 8.2 dapat dibuat diagram blok seperti pada gambar 8.3. Dengan diagram blok akan lebih mudah mem

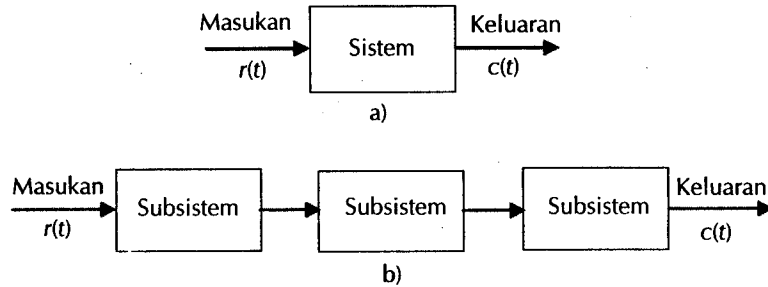


Gambar 8.3 Diagram blok sistem loop tertutup kontrol suhu

Sebuah sistem tersusun atas beberapa sistem kecil (gambar 8.4). Sistem-sistem ini digambarkan dalam diagram-diagram blok, yang dapat dituliskan persamaan matematisnya sehingga akan lebih mudah dianalisis. Dari diagram blok dicari fungsi alih yakni perbandingan antara keluaran dan masukan. Penyelesaian analisis sistem umumnya menggunakan Transformasi Laplace dalam bentuk fungsi s . Pada bab ini hanya dibahas bagaimana langkah-langkah menyederhanakan atau mereduksi diagram blok.

8.1 Definisi Sistem

Sistem adalah proses dengan masukan (input) dan keluaran (output) yang diketahui dan hubungan yang terjadi diantaranya. Sebagai contoh sistem manajemen permesinan, sistem otomotif, sistem transportasi dan ekosistem. Masukan dan keluaran akan memberikan gambaran tentang watak sebenarnya dari sistem.



Gambar 8.4 a) Sebuah sistem dengan masukan $r(t)$ sebagai acuan dan keluaran $c(t)$ sebagai variabel yang dikontrol
b) Susunan beberapa subsistem

Contoh sistem yang lain dalam bidang teknik listrik dibagi dalam beberapa kategori tergantung pada keperluannya,

- Pembangkitan tenaga listrik dan distribusi
- Monitoring piranti atau proses
- Kontrol beberapa piranti atau proses
- Prosesing sinyal
- Telekomunikasi.

8.2 Respon Sistem

Untuk melihat respon sebuah sistem maka sistem dibuat dalam bentuk-bentuk diagram blok dengan satu masukan dan satu keluaran seperti pada gambar 8.5 dengan keluaran merupakan hasil dari masukan X dan proses G itu sendiri.



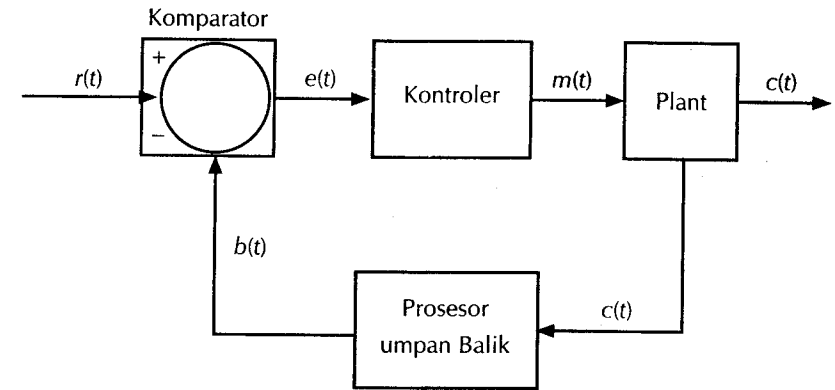
$$G = \text{Fungsi alih (Transfer Function) dalam } G(s)$$

$$(\text{Keluaran}) = (\text{Fungsi Alih}) \times (\text{Masukkan}) \quad (8.1)$$

Gambar 8.5 Sistem dengan satu masukan dan satu keluaran

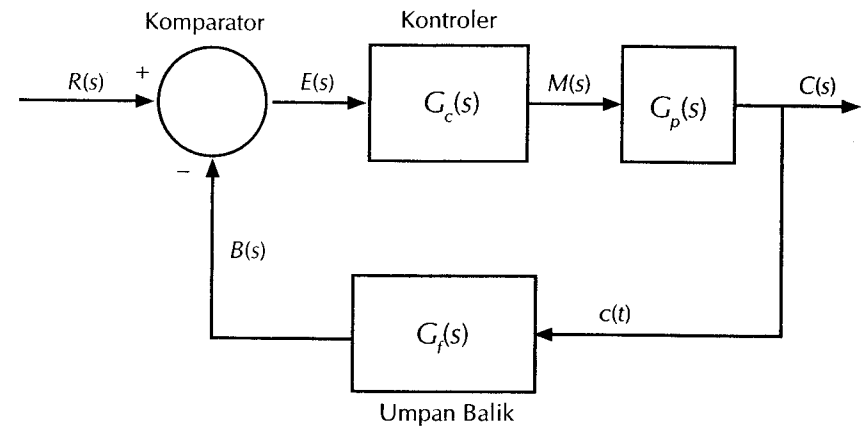
8.3 Fungsi Alih

Perbandingan antara keluaran dan masukan dinamakan Fungsi Alih (*Transfer Function*). Fungsi alih dituliskan dalam bentuk fungsi s yang merupakan hasil dari Transformasi Laplace dari fungsi t .



Gambar 8.6 Diagram blok dalam fungsi t

Hal ini dilakukan karena analisis dengan fungsi s sudah tidak dijumpai lagi diferensiasi dan integrasi dalam persamaan matematisnya seperti pada gambar 8.6 dan 8.7.



Gambar 8.7 Diagram blok dalam fungsi s

Diagram blok pada gambar 8.6 dapat diubah ke dalam fungsi s dengan metode Transformasi Laplace sesuai tabel 8.1 sehingga diperoleh gambar 8.7. Dengan cara reduksi atau penyederhanaan bentuk diagram blok akan diperoleh satu masukan dan satu keluaran saja sehingga dari gambar 8.7 diperoleh fungsi alihnya sebagai berikut,

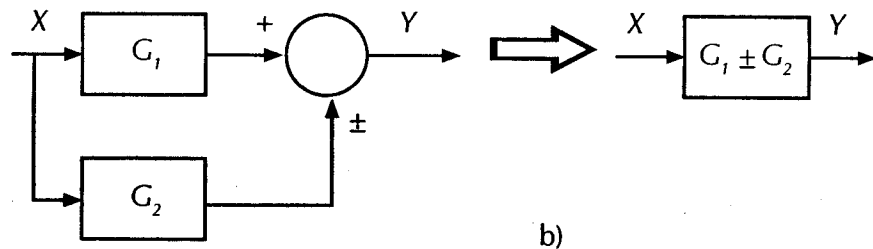
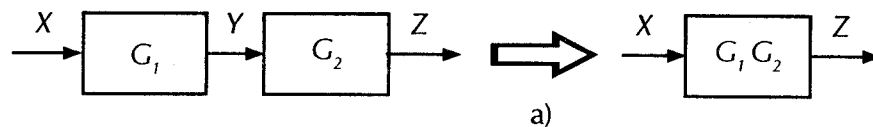
$$C(s) = G_p(s) M(s) = G_p(s) G_c(s) E(s)$$

$$E(s) = R(s) - B(s)$$

$$B(s) = C(s) G_f(s)$$

$$C(s) = G_p(s) G_c(s) \{R(s) - B(s)\}$$

Penyederhanaan atau reduksi bentuk diagram blok berdasar pada gambar 8.8.



Gambar 8.8 Reduksi (penyederhanaan) blok diagram a) Blok dalam hubungan seri (cascade) b) Blok dalam hubungan paralel.

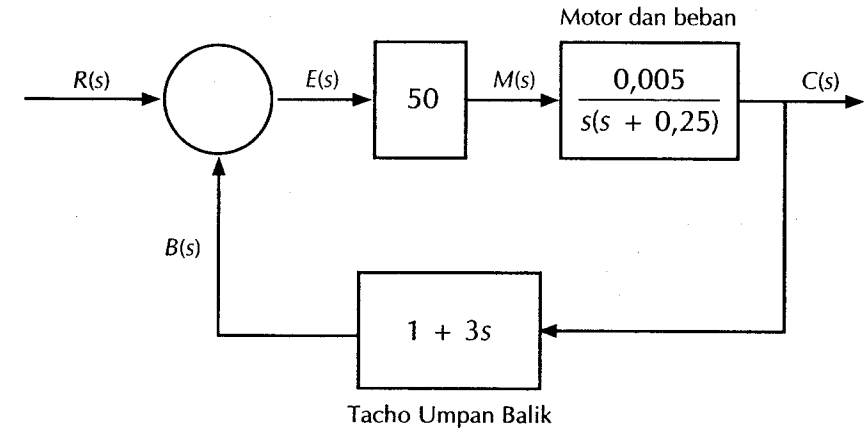
Dengan demikian diperoleh Fungsi alih untuk diagram blok gambar 8.5:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_p(s)G_c(s)}{1 + G_p(s)G_c(s)G_f(s)} \quad (8.2)$$

Untuk sistem dengan loop tertutup idealnya dengan Fungsi alih = 1

Contoh soal 8.1.

- 1) Hitung fungsi alih dari diagram blok pengaturan kecepatan motor, gambar 8.9



Gambar 8.9 Diagram blok untuk contoh soal no 1

Jawab: Untuk menentukan fungsi alih,

$$C(s) = \frac{0,005}{s(s + 0,25)} M(s)$$

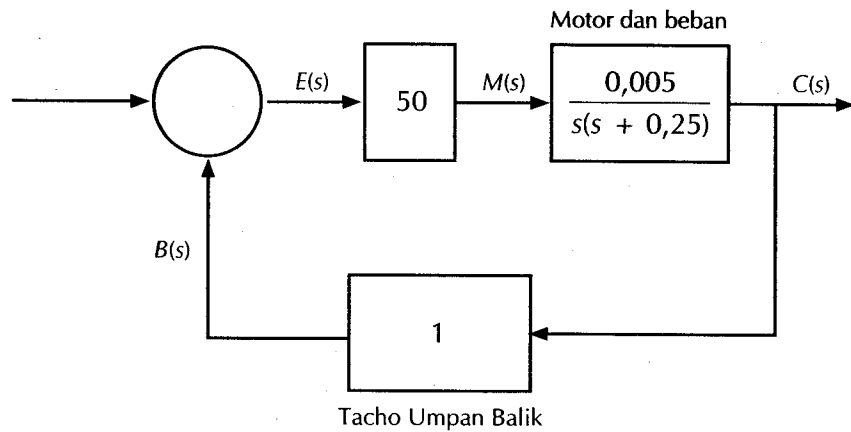
$$C(s) = \frac{0,005}{s(s + 0,25)} \times 50 E(s)$$

$$E(s) = R(s) - B(s)$$

Nilai fungsi alih:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{0,005}{s(s + 0,25)} \times 50}{1 + \frac{0,005}{s(s + 0,25)} \times 50 \times (1 + 3s)} = \frac{0,25}{(s + 0,5)^2}$$

Bila tanpa umpan balik tachometer, dengan gambar 8.10. Nilai umpan balik = 1.



Gambar 8.10 Diagram blok untuk tanpa umpan balik tachometer

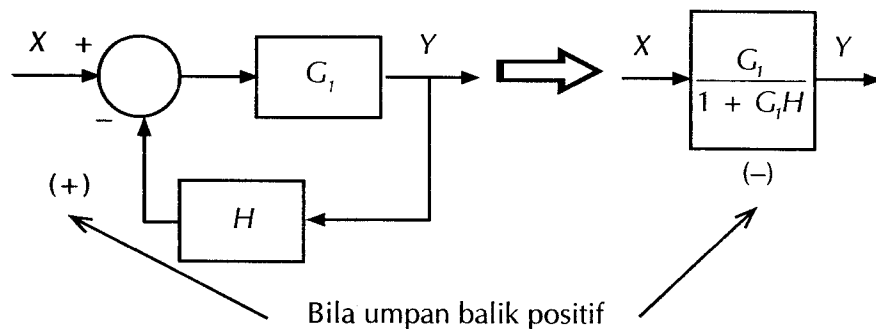
Nilai fungsi alih:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0,25}{(s + 0,125)^2 + 0,484^2}$$

8.4 Manipulasi Blok Diagram

Selain model penyederhanaan atau reduksi blok diagram yang telah dijelaskan pada gambar 8.8 masih ada beberapa model manipulasi yang sering digunakan untuk penyederhanaan blok diagram, yang akan di gambarkan dari gambar 8.11 sampai dengan gambar 8.16.

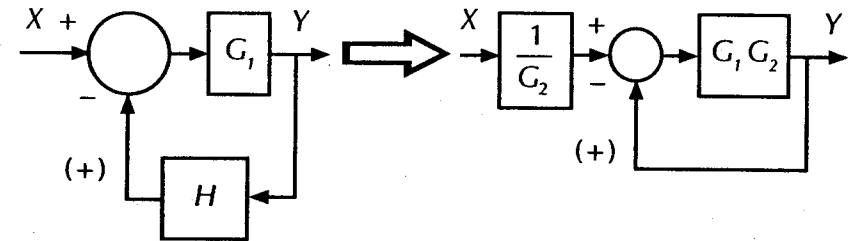
- Lop umpan balik negatif:



Gambar 8.11 Perhitungan lop umpan balik

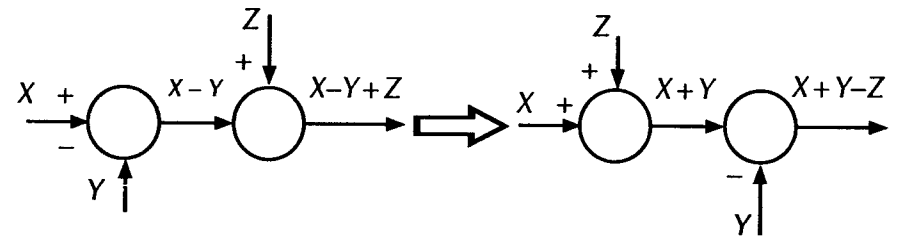
Untuk sebuah sistem kontrol diharapkan adanya umpan balik negatif, tetapi masih dimungkinkan adanya umpan balik positif pada beberapa tampilan.

- Reduksi blok dari langkah umpan balik:



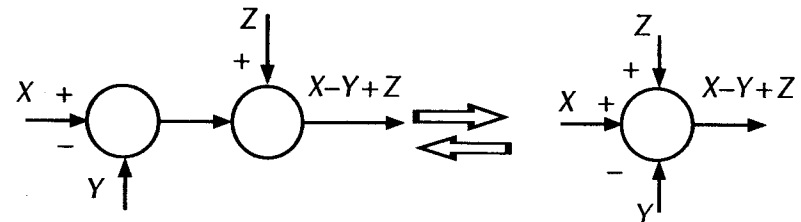
Gambar 8.12 Reduksi blok

- Saling menukarkan titik-titik penjumlahan:



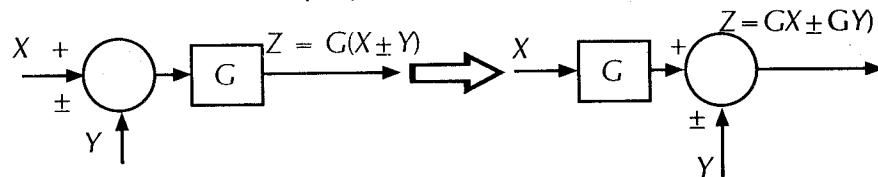
Gambar 8.13 Saling menukarkan titik penjumlahan

- Mengubah komposisi atau mengombinasikan:



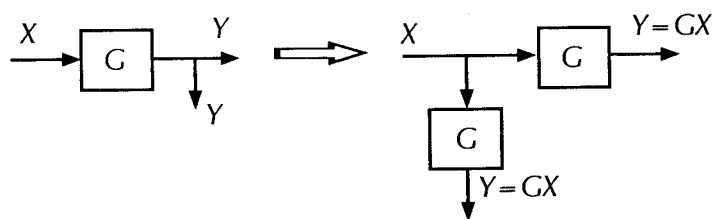
Gambar 8.14 Mengkombinasi

- Memindahkan titik penjumlahan:



Gambar 8.15 Memindahkan titik penjumlahan

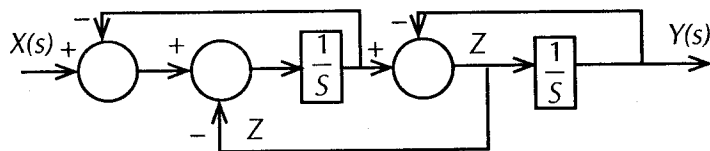
- Memindahkan titik keluaran:



Gambar 8.16 Memindahkan titik keluaran

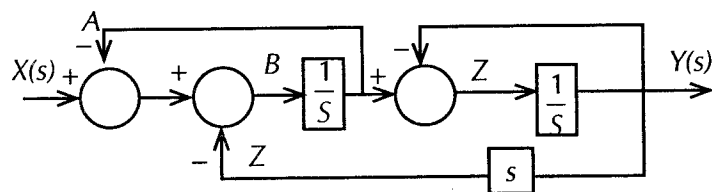
Contoh Soal 8.2

- 1) Tetapkan harga fungsi alih dari blok diagram pada gambar 8.17!



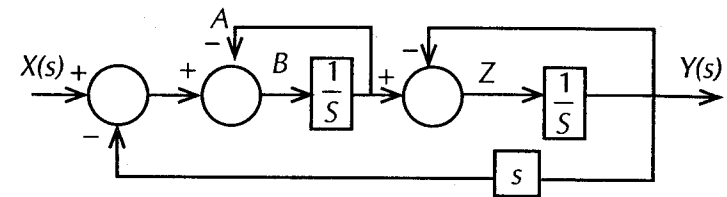
Gambar 8.17 Diagram blok untuk contoh soal no 1

Jawab: Langkah 1: Menggeser titik penjumlahan.



Gambar 8.18 Diagram blok hasil penggeseran titik penjumlahan

Langkah 2: Saling menukar titik penjumlahan.



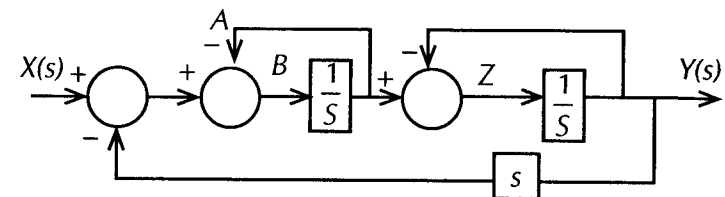
Gambar 8.19 Diagram blok hasil dari saling menukar titik penjumlahan

Nilai B sebelum saling ditukar: $B = +(X - A) - Z$

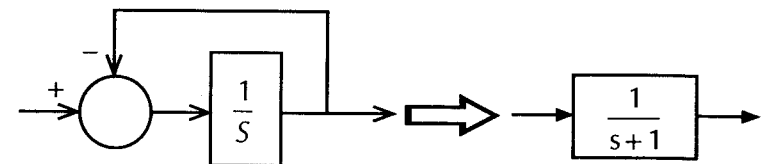
Nilai B sesudah saling ditukar: $B = +(X - Z) - A$

Ternyata hasilnya sama, tidak ada perubahan antara sebelum dan sesudah ditukar.

Langkah 3: Penggabungan lop umpan balik.

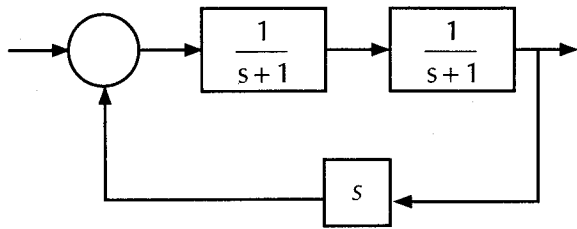


Gambar 8.20 Diagram blok hasil penggabungan lop umpan balik



Gambar 8.21 Diagram blok hasil penggabungan lop umpan balik

Hasil penggabungan diperoleh fungsi alih sebagai gambar 8.21 sehingga dapat disusun diagram blok hasil dari penyederhanaan seperti pada gambar 8.22.

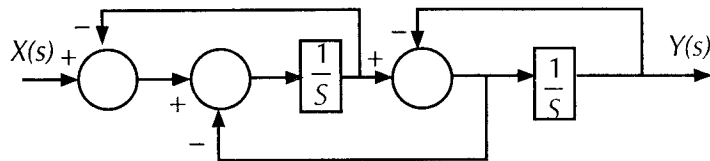


Gambar 8.22 Diagram blok hasil penyederhanaan

Hasil akhir fungsi alih adalah

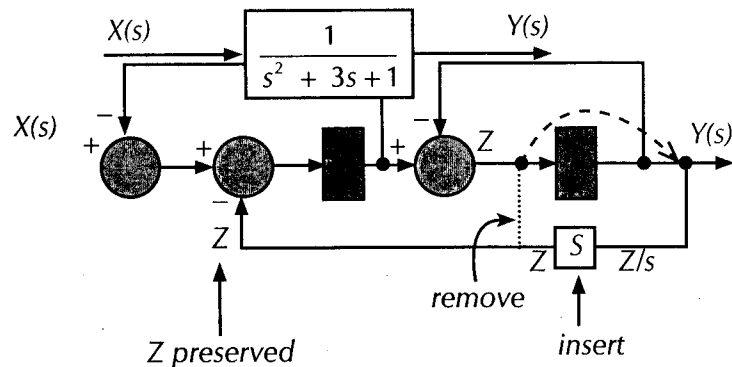
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\left(\frac{1}{s+1}\right)^2}{1 + s\left(\frac{1}{s+1}\right)^2} = \frac{1}{(s+1)^2 + s} = \frac{1}{s^2 + 3s + 1}$$

Atau dengan cara lain, dengan mengubah diagram blok gambar 8.22 menjadi diagram blok pada gambar 8.23.



Gambar 8.23 Diagram blok hasil pengubahan dari gambar 8.22

Dengan reduksi maka dari gambar 8.23 diperoleh diagram blok fungsi alih seperti pada gambar 8.24.



8.5 Daftar Pustaka

- Floyd, Thomas, F., *Principles of Electric Circuit*, Prentice Hall, 2000.
- Mismail, Budiono, *Dasar Teknik Elektro*, Bayu Media Publishing 2006.
- Paul, C.R., *Introduction To Electrical Engineering*, McGraw-Hill, Inc., 1992.
- Rizzoni, Giorgio., *Principles and applications of Electrical Engineering*, Third edition, McGraw-Hill, 2000
- Ryder, John D., *Electrical and Electronic Engineering*, McGraw-Hill Book Company, 1967
- Smith, R. J. *Circuits, Devices and Systems*. New York: John Wiley and Sons Inc., 1972.
- Norman S. Nise, *Control Systems Engineering*, John Wiley & Sons, Edisi ke empat, 2004.
- Control available at www.freestudy.co.uk/control/t3.pdf

-oo0oo-

TENTANG PENULIS

Budi Astuti lahir di Kediri tahun 1948, menamatkan pendidikan Strata I tahun 1981, sempat terhenti kuliah karena mengikuti suami yang bekerja di PT KIA Sumatera. Sempat menjadi dosen di Akademi Perindustrian AKPRIND Yogyakarta sekitar 2 tahun (1981-1983) dan kemudian sejak 1983 bergabung di Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia Yogyakarta sebagai dosen Jurusan Teknik Industri untuk mengajar Fisika Listrik Magnet, dan Teknik Tenaga Listrik. Selain sebagai dosen juga ditunjuk sebagai Kepala Laboratorium Teknik Tenaga Listrik pada jurusan yang sama (1987- 1990) Sekretaris Jurusan Teknik Industri (1990-1994) dan Pembantu Dekan II (1994-1998).

Beliau termasuk salah satu pendiri Jurusan Teknik Elektro pada fakultas yang sama pada tahun 1997 dan sekaligus ditunjuk sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro (1998-2006). Saat ini sebagai Kepala Laboratorium Instalasi dan Mesin Listrik Dasar(2007-sekarang). Karena tenaganya diperlukan maka pendidikan Strata II di Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro UGM baru diselesaikan pada tahun 2005.

Saat ini masih aktif sebagai dosen dengan jabatan Lektor Kepala dan telah memperoleh Sertifikasi Dosen. Mata kuliah yang diampu