



Siswoyo

Teknik Listrik INDUSTRI

untuk
Sekolah Menengah Kejuruan

JILID 1

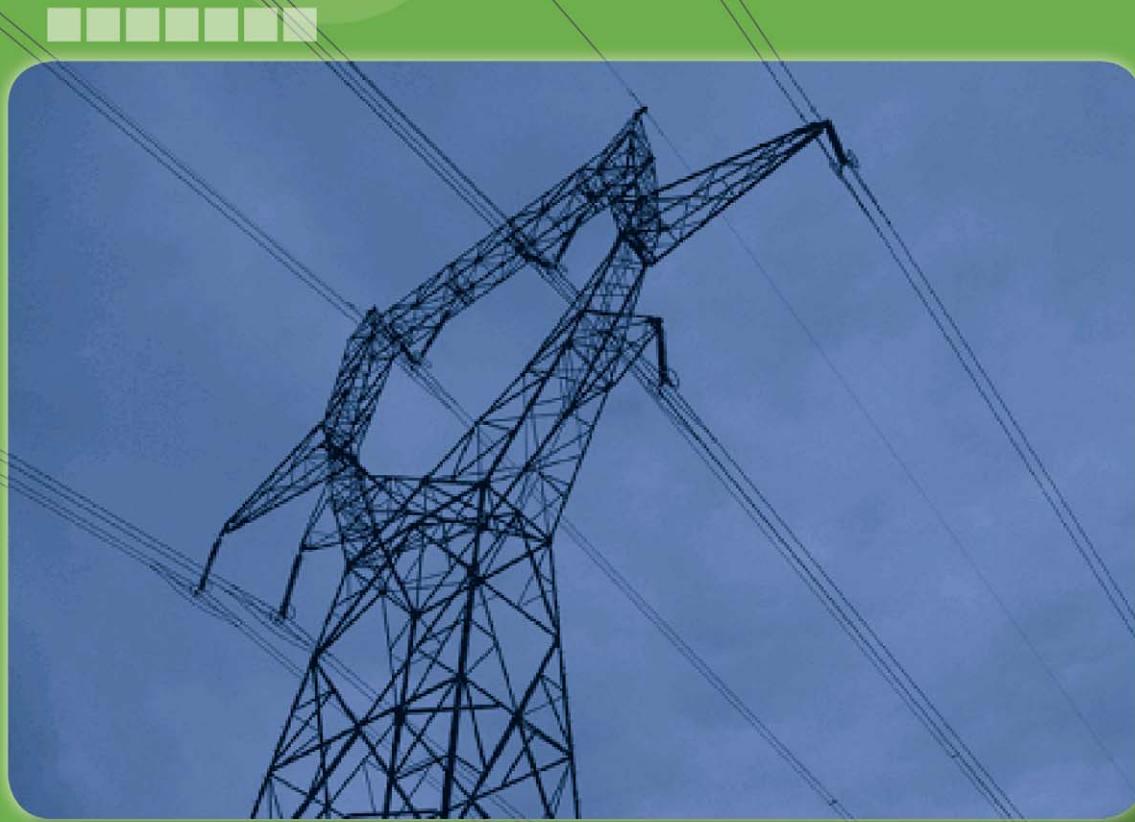
TEKNIK LISTRIK INDUSTRI JILID 1

untuk SMK

Siswoyo



Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah
Departemen Pendidikan Nasional



Siswoyo

TEKNIK LISTRIK INDUSTRI

JILID 1

SMK



Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta pada Departemen Pendidikan Nasional
Dilindungi Undang-undang

TEKNIK LISTRIK INDUSTRI

JILID 1

Untuk SMK

Penulis : Siswoyo

Perancang Kulit : TIM

Ukuran Buku : 17,6 x 25 cm

SIS SISWOYO
t Teknik Listrik Industri Jilid 1 untuk SMK /oleh Siswoyo ----
Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan,
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah,
Departemen Pendidikan Nasional, 2008.
iii , 196 hlm

ISBN : 978-979-060-081-2
ISBN : 978-979-060-082-9

Diterbitkan oleh
Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah
Departemen Pendidikan Nasional
Tahun 2008

KATA SAMBUTAN

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah Departemen Pendidikan Nasional, telah melaksanakan kegiatan penulisan buku kejuruan sebagai bentuk dari kegiatan pembelian hak cipta buku teks pelajaran kejuruan bagi siswa SMK. Karena buku-buku pelajaran kejuruan sangat sulit di dapatkan di pasaran.

Buku teks pelajaran ini telah melalui proses penilaian oleh Badan Standar Nasional Pendidikan sebagai buku teks pelajaran untuk SMK dan telah dinyatakan memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 45 Tahun 2008 tanggal 15 Agustus 2008.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada seluruh penulis yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para pendidik dan peserta didik SMK.

Buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*download*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Dengan ditayangkan *soft copy* ini diharapkan akan lebih memudahkan bagi masyarakat khususnya para pendidik dan peserta didik SMK di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri untuk mengakses dan memanfaatkannya sebagai sumber belajar.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para peserta didik kami ucapan selamat belajar dan semoga dapat memanfaatkan buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, 17 Agustus 2008
Direktur Pembinaan SMK

PENGANTAR

Era persaingan dimasa sekarang dan masa yang akan datang mensyaratkan bahwa bangsa yang unggul adalah yang memiliki kualitas sumber daya manusia yang unggul. Keunggulan SDM hanya dapat diraih melalui pendidikan. Pemerintah melalui UU Sisdiknas No 20/ 2003, jenjang pendidikan menengah kejuruan termasuk program vokasional yang mendapatkan perhatian.

Buku Teknik Listrik Industri ini disusun berdasarkan profil standar kompetensi dan kompetensi dasar untuk bidang Teknik Listrik Industri. Dengan pemahaman yang dimiliki, diharapkan dapat menyokong profesionalitas kerja para lulusan yang akan memasuki dunia kerja. Bagi para guru SMK, buku ini dapat digunakan sebagai salah satu referensi sehingga dapat membantu dalam mengembangkan materi pembelajaran yang aktual dan tepat guna. Buku ini juga bisa digunakan para alumni SMK untuk memperluas pemahamannya di bidang pemanfaatan tenaga listrik terkait dengan bidang kerjanya masing-masing.

Buku ini dibagi menjadi lima belas bab, yaitu: (1) Pengetahuan Listrik dasar (2) Kemagnetan dan elektromagnetis (3) Dasar Listrik arus bolak-balik (4) Transformator (5) Motor Listrik arus bolak balik (6) Mesin arus searah (7) Pengendalian motor listrik (8) Alat ukur dan pengukuran listrik (9) Elektronika dasar (10) Elektronika daya (11) Sistem pengamanan bahaya listrik (12) Teknik pengaturan otomatis (13) Generator sinkron (14) Distribusi tenaga listrik (15) Pembangkit listrik Mikrohidro.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktur Pembinaan SMK, Kasubdit Pembelajaran, beserta staf atas kepercayaan dan kerjasamanya dalam penulisan buku ini. Kritik dari pembaca dan kalangan praktisi akan kami perhatikan.

Semoga buku ini bermanfaat bagi banyak pihak dan menjadi bagian amal jariah bagi para penulis dan pihak-pihak yang terlibat dalam proses penyusunan buku ini.

Amin

Penulis

BAB 1

PENGETAHUAN LISTRIK DASAR

Daftar Isi :

1.1	Fenomena Elektrostatis	1-2
1.2	Generator Elektrostatis Van de Graff	1-3
1.3	Tegangan Listrik.....	1-4
1.4	Arus Listrik	1-7
1.5	Arus Listrik pada Pengantar Logam.....	1-8
1.6	Mengukur Arus Listrik	1-9
1.7	Kerapatan Arus Listrik.....	1-9
1.8	Tahanan Pengantar	1-11
1.9	Hukum Ohm	1-12
1.10	Tahanan Konduktor.....	1-13
1.11	Resistor	1-16
1.12	Hubungan Seri Resistor	1-16
1.13	Hubungan Paralel Resistor	1-17
1.14	Hukum Kirchhoff-Tegangan	1-18
1.15	Hukum Kirchoff-Arus	1-19
1.16	Mengukur Resistansi dengan Tegangan dan Arus	1-20
1.17	Tahanan Dalam Baterai	1-21
1.18	Ekivalen Sumber Tegangan dan Sumber Arus.....	1-22
1.19	Rangkaian Resistor Gabungan	1-24
1.20	Konversi Hubungan Bintang-Segitiga	1-27
1.21	Hubungan Seri Baterai.....	1-28
1.22	Rangkuman.....	1-32
1.23	Soal-Soal.....	1-34

1.1. Fenomena Elektrostatis

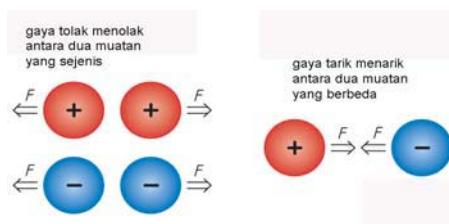
Muatan listrik adalah salah satu sifat dasar dari partikel elementer tertentu. Terdapat dua jenis muatan, *muatan positif* dan *muatan negatif*. Muatan positif pada bahan dibawa oleh *proton*, sedangkan muatan negatif oleh *elektron*. Muatan yang bertanda sama saling tolak menolak, muatan dengan tanda berbeda saling tarik menarik **gambar-1.1**.

Satuan muatan "Coulomb (C)", muatan proton adalah $+1,6 \times 10^{-19} C$, sedangkan muatan elektron $-1,6 \times 10^{-19} C$. Prinsip kekekalan menjadi- kan muatan selalu konstan. Bila suatu benda diubah menjadi energi, sejumlah muatan positif dan negatif yang sama akan hilang.

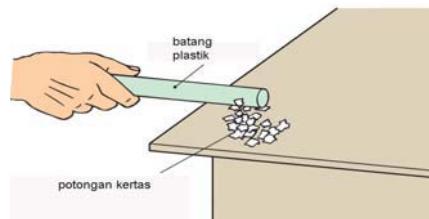
Sebatang *plastik* digosokkan pada kain beberapa saat. Dekatkan batang plastik pada potongan kertas kecil. Yang terjadi potongan kertas kecil akan menempel ke batang *plastik* **gambar-1.2**. Kejadian diatas menunjukkan fenomena muatan elektrostatis, dimana batang *plastik* bermuatan positif, menarik potongan kertas yang bermuatan negatif. Dua benda yang muatannya berbeda akan saling tarik menarik satu dengan lainnya.

Batang plastik digantung bebas dengan benang, batang plastik lainnya digosokkan dengan bulu binatang dan dekatkan ke batang *plastik* tergantung **gambar-1.3**. Yang terjadi kedua batang benda saling tolak menolak. Artinya kedua batang plastik memiliki muatan yang sama dan saling tolak menolak.

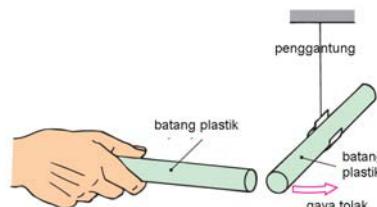
Batang *plastik* digantung bebas dengan benang. Batang kaca digosokkan dengan kain sutra dan dekatkan ke batang plastik tergantung **gambar-1.4**. Yang terjadi kedua batang benda saling tarik menarik. Artinya batang plastik dan batang gelas memiliki muatan yang berbeda dan saling tarik menarik.



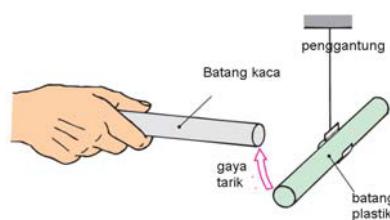
Gambar 1.1: Sifat muatan listrik



Gambar 1.2 : Fenomena elektrostatis



Gambar 1.3 : Batang plastik yang bermuatan sama saling tolak menolak



Gambar 1.4: Batang kaca dan batang plastik yang berbeda muatannya saling tarik menarik

Persamaan muatan listrik :

$$Q = n \cdot e$$

Q Muatan listrik (*Coulomb*)

n Jumlah elektron

e Muatan elektro $-1,6 \times 10^{-19} C$

Contoh : Muatan listrik $-1C$, hitung jumlah elektron didalamnya

Jawaban :

$$Q = n \cdot e$$

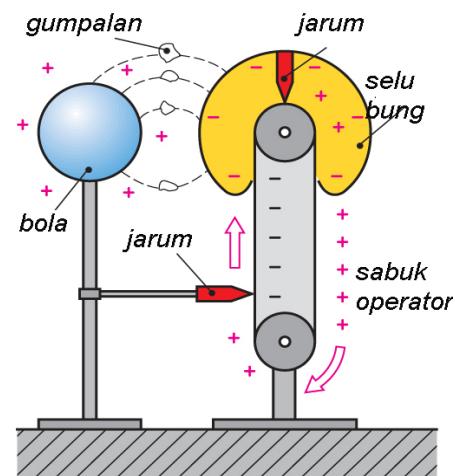
$$n = Q/e = -1/-1,6 \cdot 10^{-19} = 6,25 \cdot 10^{18}$$

Satu Coulomb adalah total muatan yang mengandung $6,25 \cdot 10^{18}$ elektron

Fenomena elektrostatis ada disekitar kita, muatan listrik memiliki *muatan positif* dan *muatan negatif*. Muatan positif dibawa oleh proton, dan muatan negatif dibawa oleh elektro. Satuan muatan "coulomb (C)", muatan proton $+1,6 \times 10^{-19} C$, sedangkan muatan elektron $-1,6 \times 10^{-19} C$. Muatan yang bertanda sama saling tolak menolak, muatan bertanda berbeda saling tarik menarik.

1.2. Generator Elektrostatis Van de Graff

Robert J Van de Graff menciptakan alat generator elektrostatis **gambar-1.5**. Prinsip kerjanya ada dua roda poly yang dipasang sebuah sabuk *non-konduktor*. Roda poly atas diberikan selubung yang bisa menghasilkan muatan positif. Roda poly diputar searah jarum jam sehingga sabuk bergerak. Sabuk akan menyentuh konduktor runcing, muatan elektrostatis positif akan berkumpul dibola bulat bagian kiri. Logam bulat bermuatan positif dan selubung yang bermuatan negatif akan muncul garis medan elektrostatis.



Gambar 1.5 : Generator elektrostatis Van de Graff

1.3. Tegangan Listrik

Tegangan atau beda potensial antara dua titik, adalah usaha yang dibutuhkan untuk membawa muatan satu coulomb dari satu titik ke titik lainnya.

1. Dua bola yang bermuatan positif dan bermuatan negatif, karena muatan keduanya sangat lemah dimana beda potensial antara keduanya mendekati nol, maka kedua bola tidak terjadi interaksi, kedua bola hanya diam saja **gambar-1.6a**.
2. Dua buah bola yang masing-masing bermuatan positif, dan negatif. Dengan muatan berbeda kedua bola akan saling tarik menarik. Untuk memisahkan kedua bola, diperlukan usaha F_1 **gambar-1.6b**.
3. Kejadian dua buah bola bermuatan positif dan negatif, dipisahkan jaraknya dua kali jarak pada contoh 2), untuk itu diperlukan usaha F_2 sebesar $2.F_1$ **gambar-1.6c**.
4. Ada empat bola, satu bola bermuatan positif dan satu bola bermuatan negatif, dua bola lainnya tidak bermuatan. Jika dipisahkan seperti contoh 3), diperlukan usaha F_2 sebesar $2.F_1$ **gambar-1.6d**.

Persamaan tegangan :

$$U = \frac{W}{Q} \quad [U] = \frac{Nm}{C} = \frac{VAs}{As} = V$$

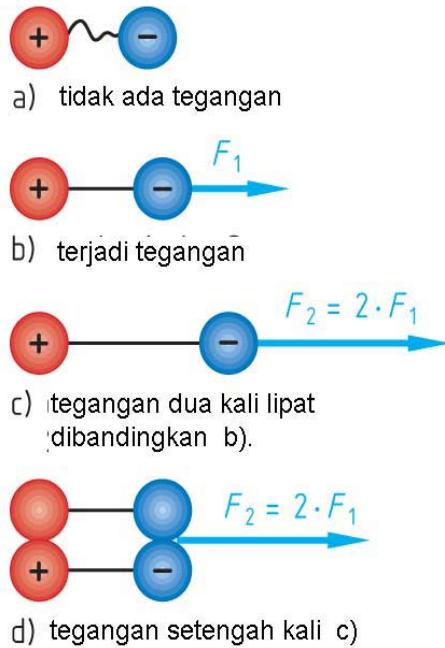
U Tegangan (V)

W Usaha (Nm, Joule)

Q Muatan (C)

Satu Volt adalah beda potensial antara dua titik jika diperlukan usaha satu joule untuk memindahkan muatan listrik satu coulomb.

Contoh : Jika diperlukan usaha 50 Joule untuk setiap memindahkan muatan sebesar 10 Coulomb. Hitung tegangan yang ditimbulkan ?



Gambar 1.6 : Model visual tegangan

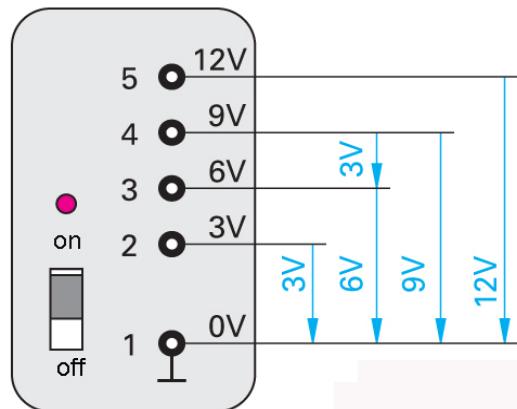
Jawaban :

$$U = \frac{W}{Q} = \frac{50 \text{ Joule}}{10 \text{ Coulomb}} = 5 \text{ V}$$

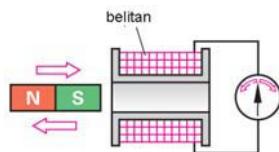
1.3.1. Sumber-sumber Tegangan

Sumber tegangan yang sering dipakai sehari-hari seperti stop kontak PLN (220V) adaptor (0-12V), accumulator (6V, 12V). Sebuah adaptor menurunkan tegangan AC 220V dengan transformator *stepdown*, kemudian tegangan AC disearahkan dengan dioda dan hasilnya listrik DC dengan tegangan yang berbeda-beda. Sebuah adaptor menyediakan tegangan DC dari 3V, 6V, 9V dan 12V **gambar-1.7**.

Secara garis besar ada lima jenis sumber tegangan yang dipakai.

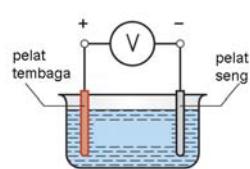


Gambar 1.7 : Sumber tegangan DC Power supply



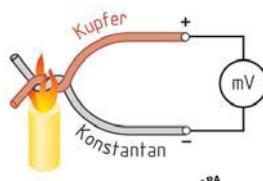
Prinsip Elektromagnet :

Belitan kawat yang didalamnya terdapat magnet pemanen, magnet digerakkan keluar masuk, diujung belitan timbul tegangan listrik. Dipakai prinsip *generator listrik*.



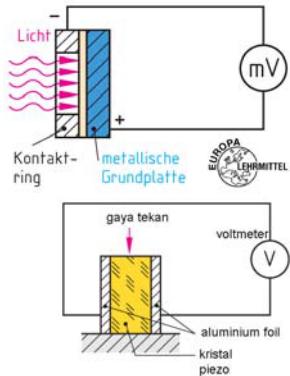
Prinsip Elektrokimia :

Dua elektrode bahan pelat tembaga kutub +, dan pelat seng kutub -. Direndam dalam elektrolit asam sulfurik. Diantara kedua ujung kutub terjadi beda tegangan. Dipakai sebagai akumulator, baterai kering.



Prinsip Thermo-elemen:

Dua logam berbeda panas jenisnya, dipanaskan pada titik sambungan logamnya. Diujung lainnya akan timbul tegangan listrik.



Prinsip Foto-elemen:

Bahan semikonduktor bila terkena cahaya, maka di kedua terminal yang berbeda timbul tegangan listrik. Dipakai sebagai sel surya.

Prinsip Piezo-Kristal:

Bahan piezo-kristal yang dipapit bahan aluminium. Piezo diberikan tekanan pada ujung berbeda timbul tegangan listrik.

Listrik dibangkitkan oleh alat pembangkit listrik. Ada lima prinsip pembangkitan listrik, yaitu prinsip generator, elektrokimia, thermo elemen, foto elemen dan piezo-kristal.

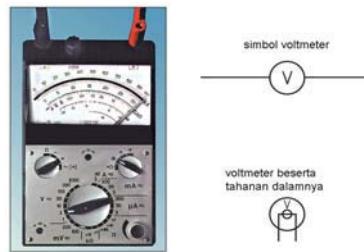
1.3.2. Pengukuran Tegangan

Tegangan listrik satuananya *Volt*, alat ukur tegangan disebut *Voltmeter*. Bentuk fisik dan simbol Voltmeter dan digabungkan untuk berbagai fungsi pengukuran listrik lainnya disebut *Multimeter* **gambar-1.8**.

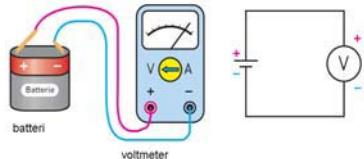
Pengukuran dengan Voltmeter harus diperhatikan, apakah listrik DC atau listrik AC. Disamping itu batas ukur tegangan harus diperhatikan, untuk mengukur tegangan DC 12 V harus menggunakan batas ukur diatasnya. Pengukuran tegangan AC 220 V, harus menggunakan batas ukur diatasnya, misalnya 500 V. Jika hal ini dilanggar, menyebabkan voltmeter terbakar dan rusak secara permanen.

Perhatian!!: Cara mengukur tegangan DC sebuah baterai, perhatikan meter switch selektor pada posisi sebagai Voltmeter, kedua perhatikan batas ukurnya (**gambar-1.9a**). Terminal positif meter terhubung ke kutub positif baterai. Terminal negatif meter ke kutub negatif baterai.

Mengukur tegangan lampu yang diberikan tegangan baterai, perhatikan terminal positif meter ke positif baterai. Kabel negatif meter ke negatif baterai **gambar-1.9b**, perhatikan batas ukur skala Voltmeter harus selalu diperhatikan.

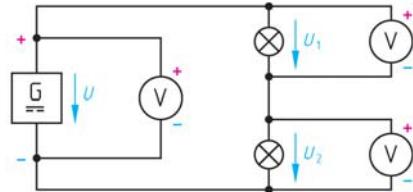
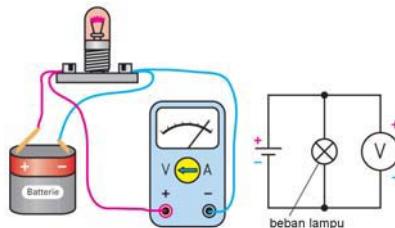


Gambar 1.8 : Simbol dan fisik Voltmeter



Gambar 1.9a :
Mengukur tegangan

Mengukur tegangan baterai dan mengukur tegangan di masing-masing lampu dilakukan dengan Voltmeter, perhatikan tanda positif dan negatif meter tidak boleh terbalik **gambar-1.9c.**



Gambar 1.9c : Voltmeter diujung-ujung beban

Gambar 1.9c
tegangan

Alat ukur tegangan listrik adalah Voltmeter. $1 \text{ mV} = 0,001 \text{ V} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ V}$,
 $1 \text{ kV} = 1000 \text{ V} = 1 \cdot 10^3 \text{ V}$, $1 \text{ MV} = 1 \text{ 000 000 V} = 1 \cdot 10^6 \text{ V}$

1.4. Arus Listrik

Aliran muatan dari satu tempat ketempat yang lain menyebabkan terjadinya arus listrik. Arus listrik bergerak dari terminal positif ke terminal negatif **gambar-1.10**. Aliran listrik dalam kawat logam terdiri dari aliran elektron, arus listrik dianggap berlawanan arah gerakan elektron.

Jika sejumlah muatan Q melewati suatu titik dalam penghantar dalam selang waktu t , maka arus dalam penghantar adalah :

Persamaan arus listrik :

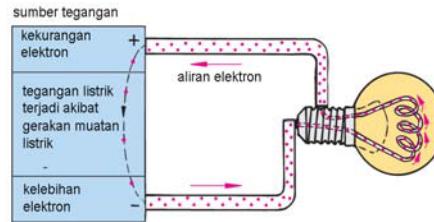
$$I = \frac{Q}{t}$$

$$[I] = \frac{C}{s} = \frac{As}{s} = A$$

I Arus listrik (A)

Q Muatan listrik (Coulomb)

t Selang waktu (detik)



Gambar 1.10 : Arus listrik mengalir ke beban

Pengetahuan Listrik Dasar

Contoh : Muatan sebanyak 0,24 Coulomb bergerak dalam 2 mili detik. hitung besarnya arus, dan jumlah elektron ?

Jawaban :

$$a) I = \frac{Q}{t} = \frac{0,24 \text{ Coulomb}}{2 \text{ ms}} = \frac{0,24 \text{ C}}{0,002 \text{ s}} = 120 \text{ A}$$

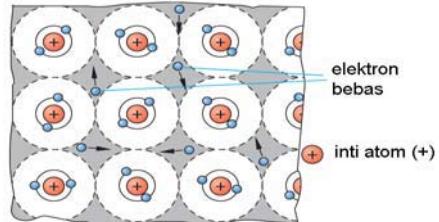
$$b) n = \frac{Q}{e} = \frac{0,24 \text{ C}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 1,5 \cdot 10^{18}$$

Arus listrik bergerak dari *terminal positif* ke *terminal negatif* dalam loop tertutup, aliran arus listrik terjadi karena terdapat beda potensial antara kutub positif dan kutub negatifnya.

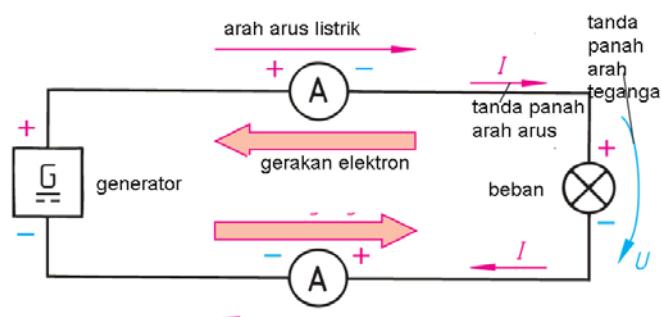
1.5. Arus Listrik pada Penghantar Logam

Logam merupakan penghantar listrik yang baik, seperti *tembaga*, *aluminium*, *besi* dsb. Dalam logam terdiri dari kumpulan atom, tiap atom terdiri atas proton bermuatan positif dan dikelilingi oleh elektron yang bermuatan negatif **gambar-1.11**.

Aliran listrik merupakan aliran elektron, artinya elektron bergerak dari yang beda potensialnya tinggi menuju yang lebih rendah, atau dari terminal positif ke terminal negatif **gambar-1.12**.



Gambar 1.11 : Atom terdiri atas proton dan elektron



Gambar 1.12 : Aliran listrik merupakan aliran elektron

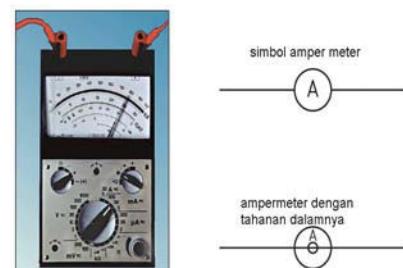
Tiap logam memiliki jumlah atom yang berbeda, sehingga ada logam yang mudah mengalirkan arus listrik karena konduktivitas yang baik. Ada logam yang konduktivitas arus listriknya lebih kecil.

1.6. Mengukur Arus Listrik

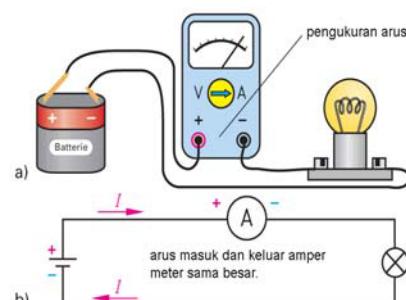
Arus listrik memiliki satuan *Amper*, dan alat ukurnya disebut *Ampermeter*. Bentuk fisik dan secara simbol *Ampermeter* dan digabung kan untuk berbagai fungsi pengukuran listrik lainnya, disebut *Multimeter* **gambar-1.13**. Berbagai macam jenis *Ampermeter*, ada yang menggunakan jarum penunjuk (meter analog) ada yang menggunakan penunjukan digital.

Pengukuran dengan *Ampermeter* harus diperhatikan, apakah listrik DC atau listrik AC. Disamping itu batas ukur arus harus diperhatikan, arus 10 A harus menggunakan batas ukur diatasnya. Jika hal ini dilanggar, *Ampermeter* terbakar dan rusak secara permanen.

Cara mengukur arus listrik DC sebuah baterai perhatikan *Ampermeter* dipasang seri dengan beban, yang kedua perhatikan batas ukurnya **gambar-1.14**. Terminal positif *Ampermeter* terhubung ke positif baterai. Terminal negatif meter ke beban dan negatif baterai.



Gambar 1.13 : Ampermeter

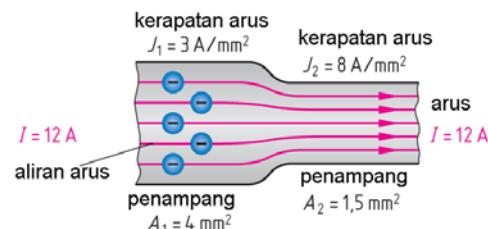


Gambar 1.14 : Mengukur arus dengan Ampermeter

Alat ukur arus listrik adalah *Ampermeter*, ada *Ampermeter* analog dan *Ampermeter* digital. Saat melakukan pengukuran batas ukur harus disesuaikan. $1 \mu\text{A} = 0,000001 \text{ A} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ A}$; $1 \text{ mA} = 0,001 \text{ A} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ A}$; $1 \text{ kA} = 1.000 \text{ A} = 1 \cdot 10^3 \text{ A}$; $1 \text{ MA} = 1.000.000 \text{ A} = 1 \cdot 10^6 \text{ A}$

1.7. Kerapatan Arus Listrik

Kerapatan arus adalah besarnya arus yang mengalir tiap satuan luas penghantar mm^2 . Arus listrik mengalir dalam kawat penghantar secara merata menurut luas penampangnya. Arus listrik 12 A mengalir dalam kawat berpenampang 4 mm^2 , maka kerapatan arusnya 3 A/mm^2 ($12 \text{ A} / 4 \text{ mm}^2$), ketika penampang penghantar mengecil $1,5 \text{ mm}^2$ maka kerapatan arusnya menjadi 8 A/mm^2 ($12 \text{ A} / 1,5 \text{ mm}^2$) **gambar-1.15**.



Gambar 1.15 : Kerapatan arus pada penghantar

Pengetahuan Listrik Dasar

Tabel 1.1 Kemampuan Hantar Arus

Penampang penghantar mm ²	Kemampuan Hantar Arus (A)			
	kelompok B2		kelompok C	
	Jumlah penghantar			
	2	3	2	3
1,5	16,5	15	19,5	17,5
2,5	23	20	27	24
4	30	27	36	32
6	38	34	46	41
10	52	46	63	57
16	69	62	85	76
25	90	80	112	96

Kerapatan arus berpengaruh pada kenaikan temperatur. Suhu penghantar dipertahankan sekitar 30°C, dimana kemampuan hantar arus kabel sudah ditetapkan dalam tabel Kemampuan Hantar Arus (KHA).

Berdasarkan tabel KHA kabel pada tabel diatas, kabel berpenampang 4 mm², 2 inti kabel memiliki KHA 30A, memiliki kerapatan arus 8,5A/mm². Dengan melihat grafik kerapatan arus berbanding terbalik dengan penampang penghantar, semakin besar penampang penghantar kerapatan arusnya mengecil **gambar-1.16**.

Persamaan kerapatan arus :

$$J = \frac{I}{A} \quad [J] = \frac{A}{mm^2}$$

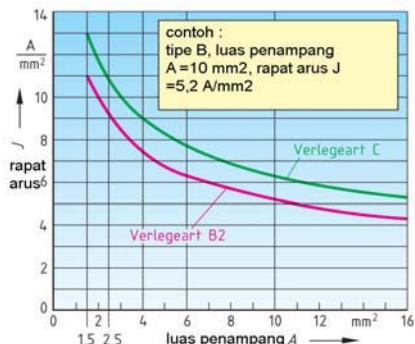
J Kerapatan Arus (A/mm²)
I Arus (A)
A Penampang kawat (mm²)

Contoh : Arus listrik 0,2 A, mengalir kawat penampang 1,5mm². Hitung a) kerapatan arusnya b) jika dilewatkan kawat diameter 0,03mm hitung penampang kawatnya dan kerapatan arusnya.

Jawaban :

$$a) J = \frac{I}{A} = \frac{0,2A}{1,5mm^2} = 0,13 \text{ A/mm}^2$$

$$b) A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,03^2 mm^2}{4} = 0,0007 \text{ mm}^2$$



Gambar 1.16 :Kurva rapat arus fungsi luas penampang

$$J = \frac{I}{A} = \frac{0,2A}{0,0007mm^2} = 286 A/mm^2$$

Kerapatan arus adalah kerapatan arus yang melalui suatu penampang penghantar dalam satuan amper per mm². Kerapatan arus berpengaruh pada pemanasan kabel.

1.8. Tahanan Penghantar

Penghantar dari bahan metal mudah mengalirkan arus listrik, tembaga dan aluminium memiliki daya hantar listrik yang tinggi. Bahan terdiri dari kumpulan atom, setiap atom terdiri proton dan elektron **gambar-1.17**. Aliran arus listrik merupakan aliran elektron.

Elektron bebas yang mengalir ini mendapat hambatan saat melewati atom sebelahnya. Akibatnya terjadi gesekan elektron dengan atom dan ini menyebabkan penghantar panas. Tahanan penghantar memiliki sifat menghambat yang terjadi pada setiap bahan.

Persamaan tahanan penghantar:

$$R = \frac{1}{G}$$

$$G = \frac{1}{R}$$

$$[R] = \frac{1}{S} = \Omega$$

$$[G] = \frac{1}{\Omega} = \Omega^{-1}$$

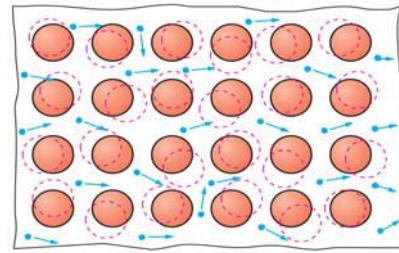
R Tahanan penghantar (Ω)

G Konduktivitas (Ω^{-1})

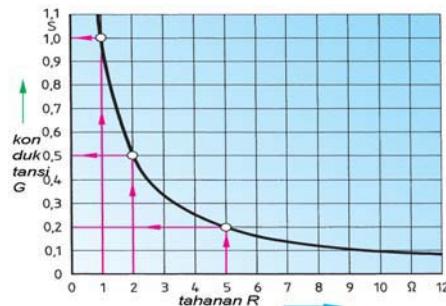
Contoh : Sejumlah kawat penghantar memiliki resistansi $R = 1\Omega$, 2Ω , 4Ω , 6Ω , 8Ω . Hitung besarnya konduktivitasnya

Jawaban :

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{1\Omega} = 1\text{s}$$



Gambar 1.17 : Kumpulan atom membentuk material



Gambar 1.18 : Kurva konduktansi fungsi tahanan R

Tabel 1.2 Resistansi dan Konduktivitas

$R (\Omega)$	1	2	4	6	8	10
$G (\Omega^{-1})$	1	0,5	0,25	0,166	0,125	0,1

Jika tabel R dan G diatas dibuat dalam grafik lihat **gambar-1.18**.

1.9. Hukum Ohm

Sumber tegangan DC yang diatur, dirangkaikan Resistor yang dapat diatur, dari Ampermeter mengukur arus dan Voltmeter mengukur tegangan **gambar-1.19**.

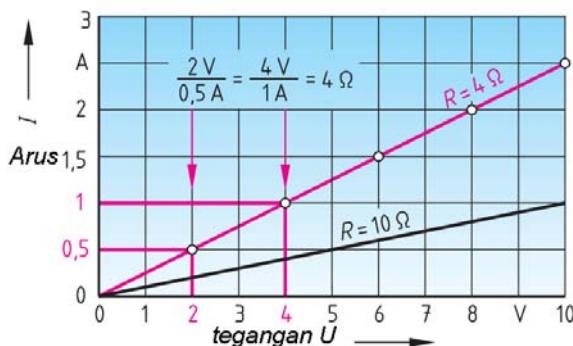
Percobaan I, dipasang Resistor 4Ω konstan dan tegangan diatur $2V$ dinaikkan setiap $2V$ sampai $10V$. Hasilnya kenaikan tegangan berbanding lurus dengan kenaikan arus.

Percobaan II, tegangan ditetapkan $10V$ Resistor dinaikkan dari 2Ω , dilanjutkan kenaikan setiap 2Ω sampai 10Ω . Hasilnya kenaikan resistansi besarnya arus berbanding terbalik.

Tabel 1.3 Tegangan dan arus pada Resistor

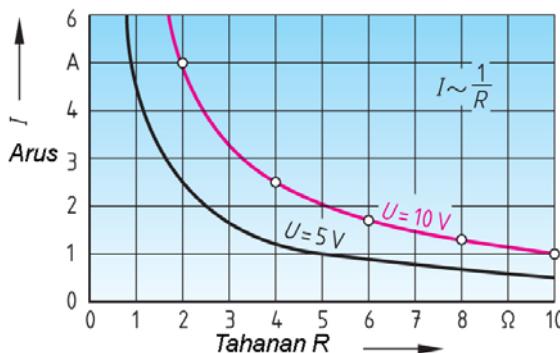
Resistor 4Ω konstan		Tegangan $10V$ konstan	
Tegangan (V)	Arus (A)	Resistor (Ω)	Arus (A)
2	0,5	2	5,0
4	1,0	4	2,5
6	1,5	6	1,67
8	2,0	8	1,25
10	2,5	10	1,0

Data percobaan I dibuat grafik arus fungsi dari tegangan **gambar-1.20a**.



Gambar 1.20a : Kurva arus fungsi tegangan

Data percobaan II dapat dibuat grafik arus fungsi dari resistansi **gambar-1.20b.**



Gambar 1.20b : Kurva arus fungsi tahanan

Persamaan Hukum Ohm :

$$R = \frac{U}{I} \rightarrow I = \frac{U}{R} \rightarrow U = R \cdot I$$

R Resistor (Ω)
 U Tegangan (V)
 I Arus (A)

Contoh :

- Resistor $1,5\Omega$ dipasang pada baterai $4,5V$. Hitung arus yang mengalir ?
- Resistor 500Ω dialiri arus $0,2A$. Hitung tegangannya ?
- Tegangan $230V$, dipasang beban dan mengalir arus $0,22A$. Hitung besarnya resistansi beban ?

Jawaban :

a) $I = \frac{U}{R} = \frac{4,5V}{1,5\Omega} = 3A$

b) $U = R \cdot I = 500\Omega \cdot 0,2 A = 100V$

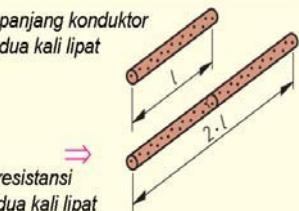
c) $R = \frac{U}{I} = \frac{230V}{0,22A} = 1945\Omega$

1.10. Tahanan Konduktor

Tahanan konduktor dipengaruhi oleh empat faktor:

1. Berbanding lurus panjang penghantar
2. Berbanding terbalik penampang penghantar
3. Jenis bahan penghantar
4. Temperatur penghantar

Tabel 1.4 Resistansi Konduktor

bahan	panjang konduktor	luas penampang
 tembaga elektron bebasnya banyak	 konstanta elektronnya lebih sedikit	 panjang konduktor dua kali lipat resistansi dua kali lipat
resistansi berbanding lurus dengan tahanan jenis $R \sim \rho$	resistansi berbanding lurus dgn panjang konduktor $R \sim l$	resistansi berbanding terbalik dengan penampang konduktor $R \sim \frac{1}{A}$
resistansi konduktor $[R] = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\frac{\text{m}}{\text{mm}^2}} \cdot \text{m} = \Omega$	$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$	R resistansi konduktor ρ tahanan jenis bahan γ konduktivitas elektrik l panjang konduktor A penampang konduktor

Besarnya tahanan konduktor sesuai hukum Ohm

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad \rho = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{m}$$

- R Tahanan konduktor (Ω)
 ρ Tahanan jenis konduktor ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)
 l Panjang konduktor (m)
 A Penampang konduktor (mm^2)

Tabel 1.5 Tahanan jenis bahan

Bahan penghantar	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{m}$	$\frac{m}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$
Aluminium (Al)	0,0278	36,0
Tembaga (Cu)	0,0178	56,0
Perak (Ag)	0,0167	60,0
Emas (Au)	0,022	45,7

Contoh : Penghantar tembaga (Cu) berpenampang $1,5 \text{ mm}^2$, panjang 50 m, tahanan jenis tembaga $0,0178 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$. Hitung tahanan penghantar tersebut

Jawaban :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = \frac{0,0178 \Omega \text{mm}^2 / \text{m} \times 50 \text{m}}{1,5 \text{mm}^2} = 0,59 \Omega$$

Tahanan penghantar dipengaruhi oleh temperatur, ketika temperatur meningkat ikatan atom makin meningkat akibatnya aliran elektron terhambat. Dengan demikian kenaikan temperatur menyebabkan kenaikan tahanan penghantar

Persamaan kenaikan tahanan pengaruh kenaikan temperatur :

$$\Delta \vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 \quad [\Delta \vartheta] = K^{\circ} ; [\vartheta] = {}^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta R = R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta \vartheta \quad [\Delta R] = \Omega \cdot \frac{1}{K} \cdot K = \Omega$$

$$R \vartheta = R_{20} + \Delta R$$

$$R \vartheta = R_{20} (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta) \quad [\alpha] = \frac{1}{K}$$

ΔR Selisih nilai tahanan (Ω)

R_{20} Tahanan penghantar suhu 20°C (Ω)

$R \vartheta$ Tahanan penghantar pada suhu tertentu (Ω)

α Koefisien temperatur tahanan

$\Delta \vartheta$ Selisih temperatur (${}^{\circ}\text{C}$)

ϑ_1 Temperatur awal (${}^{\circ}\text{C}$)

ϑ_2 Temperatur akhir (${}^{\circ}\text{C}$)

Tabel 1.6 Koefisien temperatur bahan pada 20°C

Bahan	1/K	Bahan	1/K
Besi	0,00657	Tembaga	0,0039
Timah	0,0046	Aluminium	0,004
Timah hitam	0,0042	Kuningan	0,0015
Seng	0,0042	Manganin	0,00001
Emas	0,00398	Konstanta	0,00004
Perak	0,0041	Arang batu	-0,00045

Contoh : Penghantar tembaga pada temperatur 20°C memiliki tahanan 30Ω , penghantar tersebut dalam lingkungan yang panasnya mencapai 80°C . Hitunglah tahanan penghantar pada temperatur 80°C .

Jawaban :

$$\vartheta_1 = 20^{\circ}\text{C} \quad \vartheta_2 = 80^{\circ}\text{C} \quad R_{20} = 30\Omega$$

$$\Delta \vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 = 80^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C} = 60\text{ K}$$

$$\Delta R = R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta \vartheta = 30\Omega \cdot 0,0039 \frac{1}{K} \cdot 60\text{ K} = 7,02\Omega$$

$$R \vartheta = R_{20} + \Delta R = 30\Omega + 7,02\Omega = 37,02\Omega$$

Resistansi tahanan penghantar dipengaruhi oleh empat faktor, yaitu penampang penghantar, panjang penghantar, tahanan jenis penghantar dan temperatur kerja.

1.11. Resistor

Resistor ditulis simbol huruf R dan satuan Ohm (Ω). Resistor terbuat dari bahan arang, belitan kawat, memiliki sifat menghambat atau membatasi aliran listrik.

Ada dua jenis Resistor yaitu memiliki nilai tetap dan Resistor dengan nilai berubah. Resistor dari bahan arang memiliki rating daya $1/8$ watt, $1/4$ watt, $1/2$ watt, 1 watt dan 2 watt. Resistor dari bahan belitan kawat, memiliki nilai tetap atau nilai yang dapat berubah. Resistor banyak digunakan dalam rangkaian elektronika atau rangkaian listrik.

Membaca besaran Resistor digunakan kode warna yang ada dibadan Resistor dan setiap warna memiliki ketentuan tersendiri **gambar 1.21**. Ada sembilan warna yang diurutkan yaitu : hitam (0), coklat (1), merah (2), oranye (3), kuning (4), hijau (5), biru (6), ungu (7), abu-abu (8) dan putih (9).

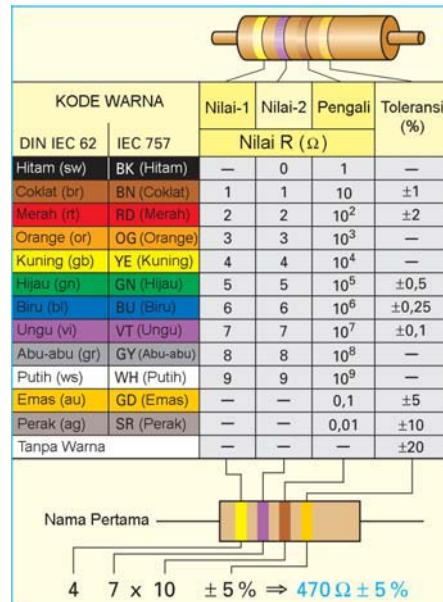
Warna gelang pertama, menyatakan angka pertama, gelang kedua menyatakan angka kedua. Gelang ketiga menyatakan faktor pengali jumlah nol dibelakang angka pertama dan kedua. Gelang keempat menunjukkan angka toleransi penyimpangannya. Ditambah dua warna untuk gelang ketiga dan keempat yaitu emas ($\pm 5\%$), perak ($\pm 10\%$) dan kosong ($\pm 20\%$).

Contoh dalam tabel tertera warna : kuning (4), ungu (7), coklat (10), emas ($\pm 5\%$), sehingga hasil akhir adalah : $470 \Omega \pm 5\%$

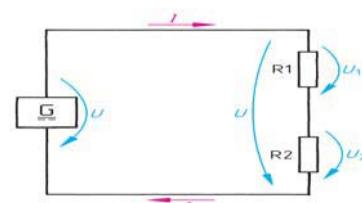
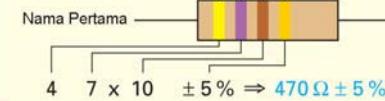
1.12. Hubungan Seri Resistor

Resistor sebagai beban dapat dalam hubungan seri, untuk mengenalinya yaitu bahwa dalam hubungan seri hanya ada satu cabang saja **gambar-1.22**. Jika beberapa Resistor dihubungkan seri, maka dapat digunakan tahanan pengganti (Rp).

Tabel 1.7 Kode warna Resistor



KODE WARNA	Nilai-1	Nilai-2	Pengali	Toleransi (%)
DIN IEC 62	IEC 757			
Hitam (sw)	BK (Hitam)	—	0	1
Coklat (br)	BN (Coklat)	1	1	± 1
Merah (rt)	RD (Merah)	2	2	± 2
Orange (or)	OG (Orange)	3	3	± 3
Kuning (gb)	YE (Kuning)	4	4	± 4
Hijau (gn)	GN (Hijau)	5	5	$\pm 0,5$
Biru (bi)	BU (Biru)	6	6	$\pm 0,25$
Ungu (vi)	VT (Ungu)	7	7	$\pm 0,1$
Abu-abu (gr)	GY (Abu-abu)	8	8	$\pm 0,05$
Putih (ws)	WH (Putih)	9	9	$\pm 0,01$
Emas (au)	GD (Emas)	—	—	± 5
Perak (ag)	SR (Perak)	—	—	± 10
Tanpa Warna		—	—	± 20



Gambar 1.22 : Seri Resistor dengan sumber DC

Persamaan tahanan pengganti seri Resistor :

$$Rp = R1 + R2 + R3 + \dots + Rn$$

Contoh : Lima buah Resistor terhubung seri, yaitu 56Ω , 100Ω , 27Ω , 10Ω dan $5,6\Omega$. Hitung besarnya tahanan pengganti (R_p).

Jawaban :

$$Rp = R1 + R2 + R3 + \dots + Rn$$

$$Rp = 56\Omega + 100\Omega + 27\Omega + 10\Omega + 5,6\Omega$$

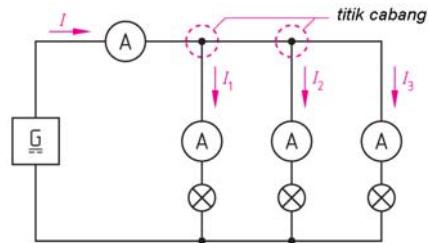
$$Rp = 198,6\Omega$$

Hubungan seri resistor besarnya tahanan total adalah penjumlahan dari masing2 resistor.

1.13. Hubungan Paralel Resistor

Beban lampu pijar dapat dianalogikan sebagai Resistor. Jika beberapa lampu pijar dipasangkan secara paralel, maka dapat dianalogikan sebagai Resistor yang terhubung secara paralel **gambar-1.23**.

Setiap lampu akan mengalirkan arus cabang yang berbeda-beda tergantung besarnya resistansi lampu. Arus total I merupakan penjumlahan arus cabang ($I_1 + I_2 + I_3$)



Gambar 1.23 : Paralel beban dengan sumber DC

Persamaan tahanan paralel :

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I = \frac{U}{R}$$

$$\frac{U}{Rp} = \frac{U}{R1} + \frac{U}{R2} + \frac{U}{R3}$$

$$\frac{1}{Rp} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3}$$

Dengan ketentuan bahwa $G = \frac{1}{R}$

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n$$

$$R_p = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad \Omega$$

Contoh : Tiga buah Resistor terhubung paralel, yaitu 10Ω , 20Ω dan 30Ω . Hitung besarnya tahanan pengganti (R_p).

Jawaban :

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_p} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{10} + \frac{1}{20} + \frac{1}{30} \\ &= \frac{1}{R_p} = \frac{6}{60} + \frac{3}{60} + \frac{2}{60} = \frac{11}{60} \quad \Rightarrow R_p = \frac{60}{11} = 5,45\Omega \end{aligned}$$

1.14. Hukum Kirchoff-Tegangan

Hukum Kirchoff-tegangan menyatakan bahwa dalam rangkaian loop tertutup, jumlah aljabar tegangan dalam cabang tertutup hasilnya nol **gambar-1.24**. Istilah lain jumlah drop tegangan sama dengan tegangan sumber tegangan. Tanda sumber tegangan berlawanan dengan tanda drop tegangan di setiap Resistor.

Persamaan hukum Kirchoff-tegangan:

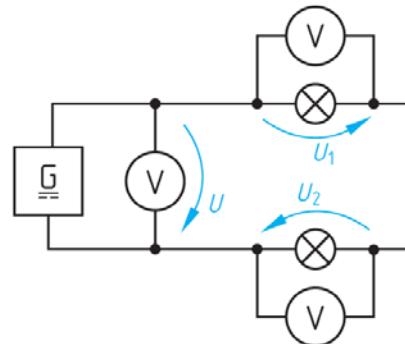
$$U + (-U_1) + (-U_2) = 0$$

$$U - U_1 - U_2 = 0$$

U Tegangan sumber

U_1 Drop tegangan R_1

U_2 Drop tegangan R_2



Gambar 1.24 : Aplikasi hukum Kirchhoff tegangan

Contoh : Sumber tegangan DC $10V$, dirangkai dengan empat Resistor 10Ω , 47Ω , 100Ω dan $X\Omega$. Hitunglah besarnya Resistor X dengan menggunakan hukum Kirchoff tegangan jika arus yang mengalir $20mA$.

Jawaban :

Pertama, menghitung drop tegangan tiap Resistor

$$U_1 = I \cdot R_1 = (20mA \cdot 10\Omega) = 0,20V$$

$$U_2 = I \cdot R_2 = (20mA \cdot 47\Omega) = 0,94V$$

$$U_3 = I \cdot R_3 = (20mA \cdot 100\Omega) = 2,00V$$

Kedua, gunakan hukum Kirchoff tegangan untuk menghitung V_4

$$U_s - U_1 - U_2 - U_3 - U_4 = 0$$

$$U_4 = U_s - U_1 - U_2 - U_3 = 10V - 0,2V - 0,94V - 2,0V = 6,86V$$

Ketiga, gunakan hukum Ohm untuk menghitung R_4

$$R_4 = \frac{U_4}{I} = \frac{6,86V}{20mA} = 343\Omega$$

Contoh : Hukum Kirchoff tegangan dapat diaplikasikan sebagai pembagi tegangan (*voltage divider*), dua buah Resistor $1k\Omega$, $8,2k\Omega$ di berikan tegangan baterai $12V$. Hitung besarnya tegangan pembagi ditiap-tiap ujung R_2 **gambar-1.25**.

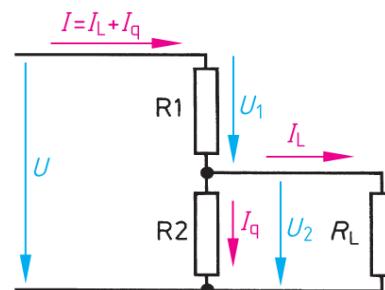
Jawaban :

Menghitung tahanan pengganti R_p

$$R_p = R_1 + R_2 = 1k\Omega + 8,2k\Omega = 9,2k\Omega$$

Menghitung tegangan pembagi

$$U_{BC} = (R_2/R_p) \cdot U_s = (8,2k\Omega/9,2k\Omega) \cdot 12V = 10,69V$$



Gambar 1.25 : Rangkaian pembagi tegangan

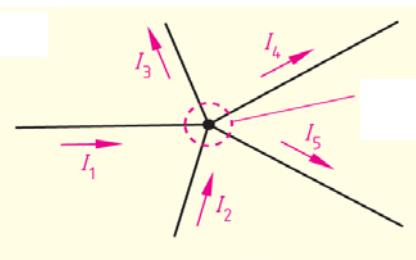
1.15. Hukum Kirchoff-Arus

Hukum Kirchoff-arus menyatakan bahwa dalam rangkaian loop tertutup, jumlah arus yang masuk dalam suatu titik sama dengan jumlah arus yang keluar dari titik tersebut **gambar-1.26**.

Aplikasi ini banyak dipakai sehari-hari, dimana beban listrik disambung paralel satu dengan lainnya. Sehingga arus total sama dengan jumlah arus tiap cabang beban.

Persamaan hukum Kirchoff-arus:

$$I_{IN1} + I_{IN2} + \dots + I_{IN(n)} = I_{OUT1} + I_{OUT2} + \dots + I_{OUT(m)}$$



$$\begin{aligned}\Sigma I &= 0 \\ \Sigma I_{zu} &= \Sigma I_{ab} \\ I_1 + I_2 &= I_3 + I_4 + I_5\end{aligned}$$

I_{IN1} Arus masuk cabang-1

Gambar 1.26 : Hukum Kirchoff-arus

Pengetahuan Listrik Dasar

- I_{IN2} Arus masuk cabang-2
 I_{OUT1} Arus keluar cabang-1
 I_{OUT2} Arus keluar cabang-2
 $I_{OUT(m)}$ Arus keluar cabang-m

Contoh : Sumber tegangan DC, dirangkai dengan dua Resistor paralel. Arus cabang-1: 5mA, arus cabang-2 : 12mA. Hitunglah besarnya arus total sumber DC dengan menggunakan hukum Kirchoff arus ?

Jawaban :

Pertama, menghitung arus total I_T dititik A

$$I_T = I_1 + I_2 = 5\text{mA} + 12\text{mA} = \mathbf{17mA}$$

Arus total yang masuk di titik B,

$$I_T = I_1 + I_2 = 5\text{mA} + 12\text{mA} = \mathbf{17mA}$$

Contoh: Sumber tegangan DC 12V, dirangkai tiga Resistor paralel $R1=1k\Omega$ $R2=2,2k\Omega$ $R3=560\Omega$. Hitung besarnya arus cabang masing masing Resistor dan arus total sumber ?

Jawaban :

$$I_1 = V_s/R_1 = 12V/1k\Omega = \mathbf{12mA}$$

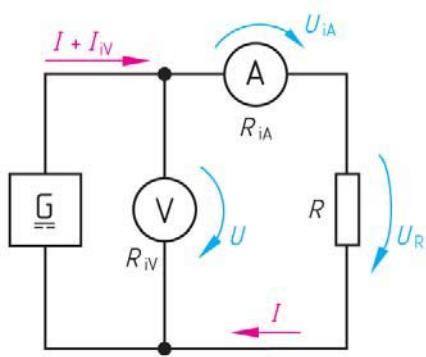
$$I_2 = V_s/R_2 = 12V/2,2k\Omega = \mathbf{5,45mA}$$

$$I_3 = V_s/R_3 = 12V/560\Omega = \mathbf{21,42mA}$$

$$\text{Arus total } I_T = I_1 + I_2 + I_3 = 12\text{mA} + 5,45\text{mA} + 21,42\text{mA} = \mathbf{38,87mA}$$

1.16. Mengukur Resistansi dengan Tegangan dan Arus

Mengukur besaran Resistor yang tidak diketahui bisa juga dilakukan dengan metode pengukuran tegangan dan arus. Digunakan dua alat ukur yaitu Voltmeter untuk mengukur tegangan dan Ampermeter untuk mengukur arus. Ada dua cara pengukuran yang hampir sama, tetapi akan menghasilkan dua persamaan yang berbeda.



Gambar 1.27 : Pengukuran tahanan nilai R kecil

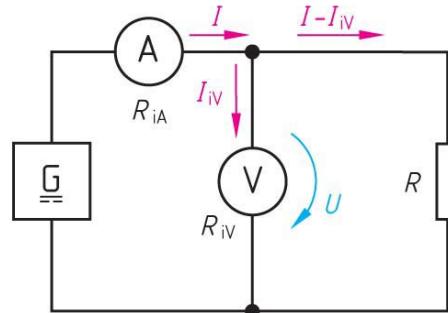
Cara Pertama periksa **gambar 1-27**

Sumber tegangan DC dipasang dengan posisi Voltmeter dekat catu daya dan Ampermeter di seri dengan beban R. Arus total yang keluar dari catu daya besarnya

sebesar $(I + I_{iV})$. Pada ujung Ampermeter terjadi drop tegangan sebesar $U_{iA} = I \cdot R_{iA}$. Sehingga besarnya tegangan pada beban R besarnya $U_R = U - U_{iA}$. Dengan mengukur besarnya arus I pada Ampermeter, mengukur tegangan U pada Voltmeter, dan mengetahui besarnya tahanan dalam Ampeter sebesar R_{iA} . Maka besarnya resistansi beban R adalah :

$$R = \frac{U - U_{iA}}{I} = \frac{U}{I} - R_{iA} \Omega$$

Cara Kedua periksa **gambar 1-28**

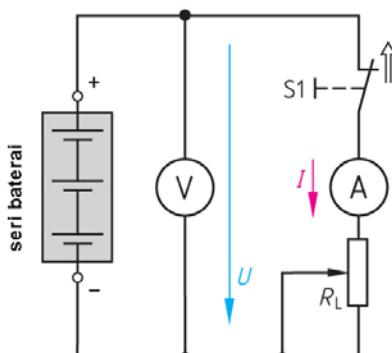


Gambar 1.28 : Pengukuran tahanan nilai R besar

Catu daya tegangan DC terhubung seri dengan Ampermeter. Sebuah Voltmeter pengukur tegangan dipasangkan paralel dengan beban Resistor R. Arus yang terukur pada Ampermeter besarnya I . Arus yang mengalir ke beban $I - I_{iV}$. Dengan mengukur arus pada Ampermeter dan mengukur tegangan pada Voltmeter, dan mengetahui tahanan dalam Voltmeter yang besarnya R_{iV} . Dapat dihitung besarnya resistansi R sebesar :

$$R = \frac{U}{I - I_{iV}} = \frac{U}{I} - R_{iV} \Omega$$

1.17. Tahanan Dalam Baterai

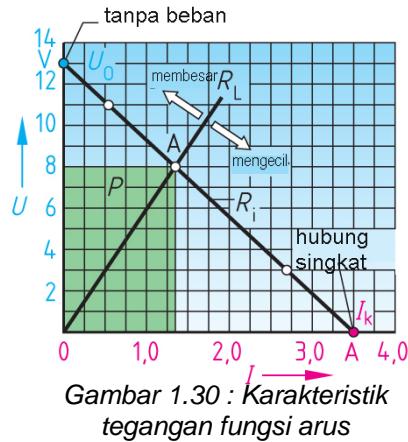


Gambar 1.29 : Pengukuran tahanan dalam baterai

Catu daya DC dapat berupa baterai atau akumulator. Sebuah catu daya DC memiliki tahanan dalam yang besarnya bisa diketahui dengan cara melakukan pengukuran tegangan dan arus. catu daya DC 4,5 Volt, dipasangkan Resistor variable RL yang dapat diatur besarnya dari 0 sampai 500Ω . Tahanan dalam Ampermeter diketahui besarnya $R_{iA} < 0,1\Omega$ **gambar-1.29**. Untuk memperoleh tahanan dalam catu daya DC dilakukan pengukuran dengan mengatur tahanan RL , kemudian dicatat data pengukuran tegangan V dan pengukuran arus A, yang dibuat dalam bentuk tabel dibawah ini :

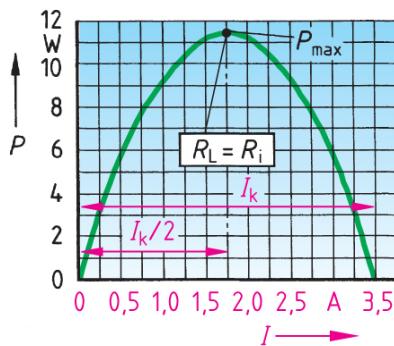
Tabel 1.8 Pengukuran

RL (Ω)	≈	50,1	20,1	10,1	6,1	4,1	3,1	2,1	1,1	0,6	0,1
I (A)	0	0,24	0,55	0,94	1,33	1,67	1,91	2,24	2,71	3,02	3,42
U (V)	13	12,1	11,0	9,5	8,1	6,8	5,9	4,7	3,0	1,8	0,38
P (W)	0	2,9	6,0	8,9	10,8	11,4	11,3	10,5	8,1	5,4	1,2



Dengan data pengukuran tegangan dan arus, maka tabel daya dapat diisi dengan menggunakan persamaan $P = U \cdot I$. dari tabel diatas dapat dibuat tabel yang hasilnya seperti gambar dibawah.

Karakteristik tegangan fungsi arus **gambar 1-30**, garis beban dapat ditarik pada dua titik, yaitu pada saat tegangan tanpa beban besarnya 13,1V dan saat terjadi hubung singkat 3,42A. Dari tabel diperoleh baris daya akan meningkat maksimum sampai 11,4 W dan kemudian menurun kembali. Saat terjadi daya maksimum tercatat tegangan besarnya 6,8V dan arus 1,67A. Titik ini disebut sebagai daya maksimum di titik A. Dititik A ini jika nilai R_L bisa membesar atau jika digeser akan mengecil.



Karakter

istik daya fungsi arus **gambar 1-31** merupakan plotting dari tabel-2 diatas. tampak garis daya melengkung dari kecil kemudian membesar sampai dicapai titik daya maksimum di titik P_{maks} . Jika tahanan R_L diturunkan dan arus makin meningkat daya justru menurun kembali. Saat dititik P_{maks} . yang terjadi adalah besarnya $R_L = R_i$, dimana R_i merupakan tahanan dalam catu daya DC.

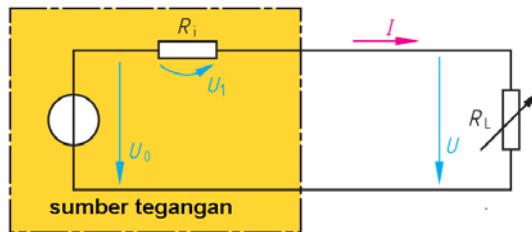
1.18. Ekivalen Sumber Tegangan dan Sumber Arus

Catu daya DC memiliki tahanan dalam R_i , tahanan dalam catu daya memiliki pengaruh terhadap tegangan dan arus yang dapat dialirkan ke beban. Untuk kebutuhan analisis rangkaian listrik, dapat dijelaskan dua cara, yaitu dengan pendekatan ekivalen sumber tegangan dan ekivalen sumber arus.

Rangkaian ekivalen sumber tegangan

Rangkaian ekivalen sumber tegangan **gambar 1-32**, memperlihatkan tahanan dalam catu daya dihubungkan seri dengan sumber tegangan.

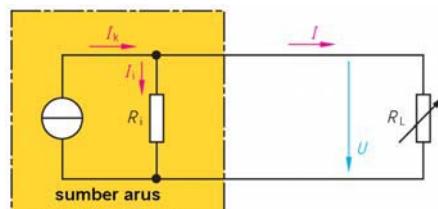
Tahanan dalam baterai R_i yang dialiri arus sebesar I akan terjadi drop tegangan sebesar $= I \cdot R_i$. Besarnya tegangan terminal adalah selisih tegangan baterai dikurangi tegangan drop tahanan dalam baterai. Besarnya tegangan di terminal beban R_L berlaku per samaan : $U = U_o - I \cdot R_i$



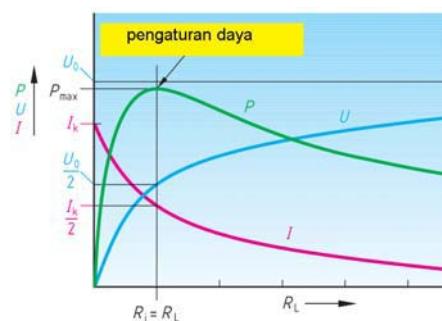
Gambar 1.32 : Rangkaian ekivalen sumber tegangan

Rangkaian ekivalen sumber arus

Rangkaian ekivalen sumber arus **gambar 1-33**, memperlihatkan tahanan dalam R_i tehubung paralel dengan sumber arus. Sesuai kaidah hukum Kirchoff arus berlaku $I_k = I + I_L$. Arus yang ditarik oleh beban R_L besarnya I . dengan mengatur nilai R_L maka arus beban dapat diatur sebanding dengan nilai tahanan R_L .



Gambar 1.33 : Rangkaian ekivalen sumber arus

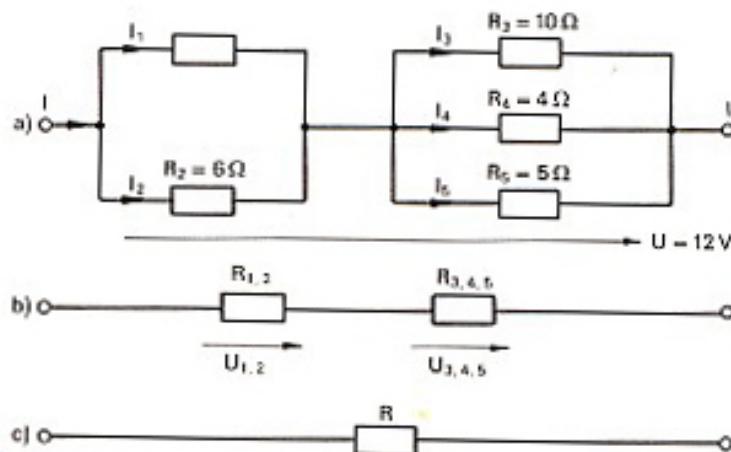


Gambar 1.34 : Karakteristik daya terhadap perubahan tahanan

1.19. Rangkaian Resistor Gabungan

Dalam prakteknya Resistor dihubungkan dengan berbagai kombinasi seri, paralel, campuran seri dan paralel. Untuk menghitung tahanan pengganti dilakukan dengan menghitung secara bertahap.

Contoh-1 : Lima buah Resistor $R_1 = 4\Omega$, $R_2 = 6\Omega$, $R_3 = 10\Omega$, $R_4 = 4\Omega$, dan $R_5 = 5\Omega$ **gambar 1-35**, Hitunglah besarnya tahanan pengganti dari kelima tahanan tersebut, menghitung drop tegangan dan besarnya arus cabang ?



Gambar 1.35 : Rangkaian tahanan a) sebenarnya
b) disederhanakan c) hasil akhir

Jawaban :

1. Menghitung R_{12} yang paralel dengan R_2 :

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{4\Omega \cdot 6\Omega}{4\Omega + 6\Omega} = 2,4\Omega$$

2. Menghitung $R_{3,4,5}$ yang masing-masing tersambung paralel

$$R_{3,4,5} = \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}} = \frac{1}{\frac{1}{10\Omega} + \frac{1}{4\Omega} + \frac{1}{5\Omega}} = 1,82\Omega$$

3. Menghitung tahanan pengganti akhir :

$$R = R_{12} + R_{345} = 2,4\Omega + 1,82\Omega = 4,22\Omega$$

4. Menghitung arus total

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12V}{4,22\Omega} = 2,84A$$

5. Menghitung drop tegangan U_{12} dan U_{345} :

$$U_{12} = I \cdot R_{12} = 2,84A \cdot 2,4\Omega = 6,82V$$

$$U_{345} = I \cdot R_{345} = 2,84A \cdot 1,82\Omega = 5,18V$$

Tegangan catu daya = 12 V

6. Menghitung arus cabang I_1, I_2, I_3, I_4 dan I_5

$$I_1 = \frac{U_{12}}{R_1} = \frac{6,82V}{4\Omega} = 1,7A$$

$$I_2 = \frac{U_{12}}{R_2} = \frac{6,82V}{6\Omega} = 1,14A$$

Untuk pengecekan sesuai hukum Kirchoff arus

$$I = I_1 + I_2 = 1,7A + 1,14A = 2,84A$$

$$I_3 = \frac{U_{345}}{R_3} = \frac{5,17V}{10\Omega} = 0,517A$$

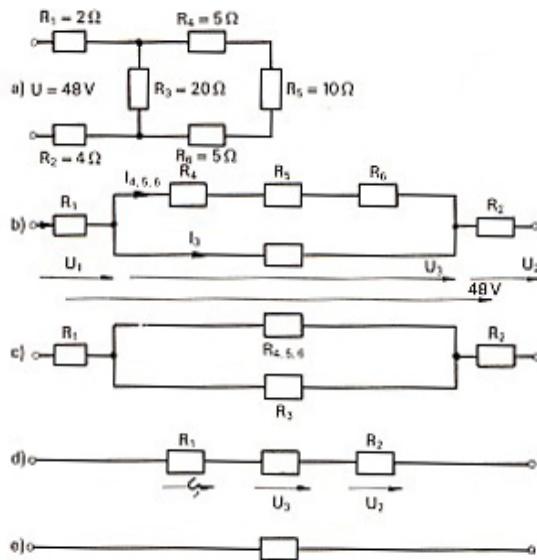
$$I_4 = \frac{U_{345}}{R_4} = \frac{5,17V}{4\Omega} = 1,29A$$

$$I_5 = \frac{U_{345}}{R_5} = \frac{5,17V}{5\Omega} = 1,03A$$

Untuk pengecekan sesuai hukum Kirchoff arus

$$I = I_3 + I_4 + I_5 = 0,517A + 1,29A + 1,03A = 2,84A$$

Contoh2 : Resistor dengan bentuk seperti gambar 1-36, terdiri Resistor $R_1 = 2\Omega$, $R_2 = 4\Omega$, $R_3 = 20\Omega$, $R_4 = 5\Omega$, $R_5 = 10\Omega$ dan $R_6 = 5\Omega$, dipasang pada catu daya DC 48V. Hitunglah tahanan pengganti dan besarnya arus cabang I_{456} ?



Jawaban :

1. Menghitung tahanan pengganti R_{3456}

$$R_{3456} = \frac{20\Omega \cdot 20\Omega}{20\Omega + 20\Omega} = 10\Omega$$

$$R = R_1 + R_{3456} + R_2 = 2\Omega + 10\Omega + 4\Omega = 16\Omega$$

2. Menghitung arus total dari catu daya DC

$$I = \frac{U}{R} = \frac{48V}{16\Omega} = 3A$$

3. Menghitung drop tegangan U_1 , U_2 dan U_3

$$U_1 = I \cdot R_1 = 3A \cdot 2\Omega = 6V$$

$$U_2 = I \cdot R_2 = 3A \cdot 4\Omega = 12V$$

$$U_3 = I \cdot R_{3456} = 3A \cdot 10\Omega = 30V$$

$$\text{Tegangan catu daya } U = U_1 + U_2 + U_3 = 6V + 12V + 30V = 48V$$

4. Menghitung arus cabang I_{456} .

$$I_{456} = \frac{U_3}{R_{456}} = \frac{30V}{20\Omega} = 1,5A$$

5. Menghitung drop tegangan U_4 , U_5 dan U_6

$$U_4 = I_{456} \cdot R_4 = 1,5 A \cdot 5\Omega = 7,5 V$$

$$U_5 = I_{456} \cdot R_5 = 1,5 A \cdot 10\Omega = 15V$$

$$U_6 = I_{456} \cdot R_6 = 1,5 \text{ A} \cdot 5\Omega = 7,5 \text{ V}$$

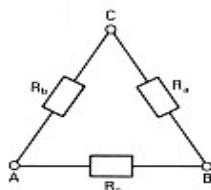
Tegangan $U_3 = U_6 + U_5 + U_4 = 7,5 \text{ V} + 15 \text{ V} + 7,5 \text{ V} = 30 \text{ V}$

6. Menghitung arus cabang I_3

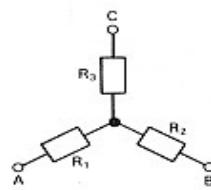
$$I_3 = \frac{U_3}{R_3} = \frac{30 \text{ V}}{20\Omega} = 1,5 \text{ A}$$

1.20. Konversi Hubungan Bintang-Segitiga

Resistor yang terhubung segitiga dapat dikonversikan ke dalam hubungan bintang, atau sebaliknya dari hubungan bintang dapat dikonversikan menjadi hubungan segitiga.



a) segitiga



b) bintang

a) Persamaan konversi hubungan bintang menjadi hubungan segitiga

$$R_{AB} = \frac{R_a \cdot (R_b + R_c)}{R_a + R_b + R_c} = R_1 + R_3$$

$$R_{BC} = \frac{R_a \cdot (R_b + R_c)}{R_a + R_b + R_c} = R_2 + R_3$$

$$R_{AC} = \frac{R_b \cdot (R_a + R_c)}{R_a + R_b + R_c} = R_1 + R_2$$

b) Persamaan konversi hubungan segitiga menjadi hubungan bintang

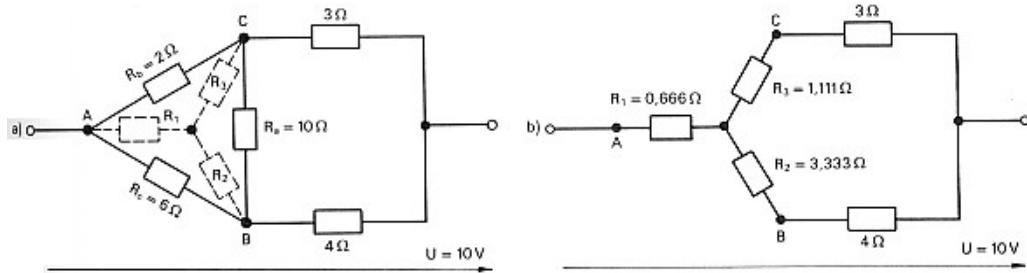
$$R_1 = \frac{R_a \cdot R_c}{R_a + R_b + R_c}$$

$$R_2 = \frac{R_a \cdot R_c}{R_a + R_b + R_c}$$

$$R_3 = \frac{R_a \cdot R_b}{R_a + R_b + R_c}$$

Contoh : Resistor dengan hubungan seperti gambar 1-37 akan dihitung tahanan pengantinya,

Jawaban :



- Mengkonversikan hubungan segitiga menjadi hubungan bintang dengan persamaan :

$$R_1 = \frac{R_a \cdot R_c}{R_a + R_b + R_c}$$

$$R_1 = \frac{2\Omega \cdot 6\Omega}{10\Omega + 2\Omega + 6\Omega} = 0,666\Omega$$

$$R_2 = \frac{R_a \cdot R_b}{R_a + R_b + R_c}$$

$$R_2 = \frac{10\Omega \cdot 6\Omega}{10\Omega + 2\Omega + 6\Omega} = 3,333\Omega$$

$$R_3 = \frac{R_a \cdot R_b}{R_a + R_b + R_c}$$

$$R_3 = \frac{10\Omega \cdot 2\Omega}{10\Omega + 2\Omega + 6\Omega} = 1,111\Omega$$

- Menghitung tahanan pengganti dengan membuat penyederhanaan sebagai berikut :

$$R = 0,666\Omega + \frac{(1,111\Omega + 3\Omega)(3,333\Omega + 4\Omega)}{(1,111\Omega + 3\Omega) + (3,333\Omega + 4\Omega)}$$

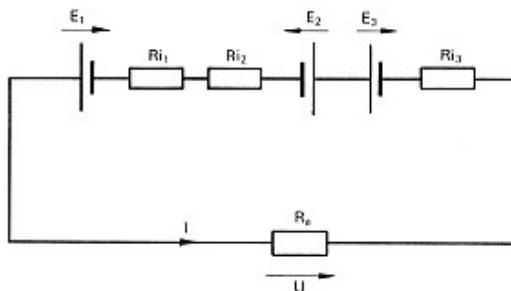
$$R = 0,666\Omega + 2,634\Omega = 3,3\Omega$$

1.21. Hubungan Seri Baterai

Baterai merupakan catu daya DC, bisa berujud baterai basah, sering disebut akumulator atau baterai kering. Baterai terdiri tas beberapa sel, akumulator

tiap selnya menghasilkan 2 V, dengan menghubungkan secara seri tiap selnya akan dihasilkan tegangan terminal 6V, 12V atau 24V.

Baterai kering atau sering disebut batu baterai, tiap selnya menghasilkan tegangan 1,5V, empat baterai kering dihubungkan seri akan menghasilkan tegangan 6V. baik baterai basah atau baterai kering memiliki tahanan dalam R_i , baterai yang terhubung secara seri **gambar 1-38** dapat dihitung besarnya tahanan dalam baterai, tegangan terminal dan besarnya arus beban



Gambar 1-38 Baterai terhubung seri dengan Beban Ra

Tahanan dalam baterai terhubung seri sebanyak n buah :

$$R_{i\ tot} = R_{i\ 1} + R_{i\ 2} + \dots + R_{i\ n} = \Sigma R_i$$

$$R_{tot} = R_{i\ tot} + R_a$$

Besarnya tegangan terminal baterai, adalah penjumlahan tegangan masing-masing baterai.

$$E_{tot} = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \Sigma E$$

Dengan tahanan dalam baterai $R_{i\ total}$ dan tahanan beban R_a , besarnya arus yang mengalir dari baterai :

$$I = \frac{E_{tot}}{R_{i\ tot} + R_a}$$

$$U = I \cdot R_a = E_{tot} - U_{i\ tot}$$

$$U_{i\ tot} = I \cdot R_{i\ tot} = E_{tot} - U$$

$$I_k = \frac{E}{R_{i\ tot}}$$

$$R_{i\ tot} = n \cdot R_i$$

$$R_{tot} = R_a + n \cdot R_i$$

$$E_{\text{tot}} = n \cdot E$$

$$I = \frac{n \cdot E}{R_a + n \cdot R_t}$$

$$U = I \cdot R_a$$

$$U_{i \text{ tot}} = I \cdot n \cdot R_i$$

$$I_k = \frac{n \cdot E}{n \cdot R_t} = \frac{E}{R_t}$$

$$n = \frac{E_{\text{tot}}}{E} = \frac{112V}{2V} = 56 \text{ zeller}$$

Contoh: Empat buah baterai dihubungkan seri, masing-masing baterai memiliki tahanan dalam, dipasang sebuah Resistor Ra.

$$E_1 = 1,5V \quad R_{i1} = 0,15 \Omega$$

$$E_2 = 1,5V \quad R_{i2} = 0,2 \Omega$$

$$E_3 = 2,1V \quad R_i = 0,1 \Omega$$

$$E_4 = 2,1V \quad R_i = 0,15 \Omega$$

$$R_a = 1,2 \Omega$$

Hitunglah besarnya $R_{i \text{ tot}}$, R_{tot} , E_{tot} , I , U , $U_{i \text{ tot}}$, I_k

Jawaban :

$$R_{i \text{ tot}} = R_i + R_{i2} + \dots = 0,15 \Omega + 0,2 \Omega + 0,1 \Omega + 0,15 \Omega = 0,60 \Omega$$

$$R_{\text{tot}} = R_{i \text{ tot}} + R_a = 0,60 \Omega + 1,2 \Omega = 1,80 \Omega$$

$$E_{\text{tot}} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \dots = 1,5 V + 1,5 V + 2,1 V + 2,1 V = 7,2 V$$

$$I = \frac{E_{\text{tot}}}{R_{i \text{ tot}} + R_a} = \frac{7,2V}{1,80 \Omega} = 4A$$

$$U = I \cdot R_a = 4 A \cdot 1,2 \Omega = 4,8 V$$

$$U_{i \text{ tot}} = E_{\text{tot}} - U = 7,2 V - 4,8 V = 2,4 V$$

$$I_k = \frac{E_{\text{tot}}}{R_{i \text{ tot}}} = \frac{7,2V}{0,6 \Omega} = 12 A$$

Contoh : Tiga buah baterai dihubungkan seri, masing-masing memiliki tahanan dalam dan dipasang sebuah Resistor Ra.

$$E_1 = 2 V \quad R_{i1} = 0,2 \Omega$$

$$E_2 = 1,5 \text{ V} \quad R_{i2} = 0,3 \Omega$$

$$E_3 = 2 \text{ V} \quad R_{i3} = 0,1 \Omega$$

$$R_a = 1\Omega$$

Hitunglah besarnya tegangan total, dan besarnya arus melalui resistor, jika terjadi hubung singkat, hitung besarnya arus hubung singkat.

Jawaban :

$$E_{\text{tot}} = E_1 - E_2 + E_3 = 2V - 1,5 \text{ V} + 2 \text{ V} = 2,5 \text{ V}$$

$$I = \frac{E_{\text{tot}}}{R_{i\text{tot}}} = \frac{2,5 \text{ V}}{0,2\Omega + 0,3\Omega + 0,1\Omega + 1\Omega} = 1,56 \text{ A}$$

$$U = I \cdot R = 1,56 \text{ A} \cdot 1\Omega = 1,56 \text{ V}$$

$$I_k = \frac{E_{\text{tot}}}{R_{i\text{tot}}} = \frac{2,5 \text{ V}}{0,2\Omega + 0,3\Omega + 0,1\Omega} = 4,16 \text{ A}$$

$$R_{i\text{tot}} = \frac{R_{i \text{ masing-masing}}}{m}$$

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{masing-masing}}$$

$$R_{i\text{tot}} = \frac{R_{i \text{ masing-masing}}}{m} = \frac{0,24\Omega}{6} = 0,04\Omega$$

$$E_{\text{tot}} = E = 1,5 \text{ V}$$

$$I = \frac{E}{R_{i\text{tot}} + R_a} = \frac{1,5 \text{ V}}{0,04\Omega + 1\Omega} = 1,44 \text{ A}$$

$$U = I \cdot R_a = 1,44 \text{ A} \cdot 1\Omega = 1,44 \text{ V}$$

$$U_i = I \cdot R_{i\text{tot}} = 1,44 \text{ A} \cdot 0,04 \Omega = 0,056 \text{ V}$$

$$I_k = \frac{E}{R_{i\text{tot}}} = \frac{1,5 \text{ V}}{0,04\Omega} = 3,75 \text{ A}$$

$$I_0 = \frac{E_1 - E_2}{R_{i1} + R_{i2}}$$

$$R_{i\text{tot}} = \frac{n \cdot R_i}{m} = \frac{3 \cdot 0,3\Omega}{4} = 0,225\Omega$$

$$E_{tot} = n \cdot E = 3,15 \text{ V} = 4,5 \text{ V}$$

$$I = \frac{n \cdot E}{R_a + \frac{R_b \cdot n}{m}} = \frac{4,5 \text{ V}}{3,5 \Omega + 0,225 \Omega} = 1,21 \text{ A}$$

$$U_{i\ tot} = I \cdot R_{i\ tot} = 1,21 \text{ A} \cdot 0,225 \Omega = 0,272 \text{ V}$$

$$U = I \cdot R_a = 1,21 \text{ A} \cdot 3,5 \Omega = 4,23 \text{ V}$$

$$R_1 = \frac{R_b \cdot R_a}{R_a + R_b + R_a} = \frac{2\Omega \cdot 6\Omega}{10\Omega + 2\Omega + 6\Omega} = 0,666\Omega$$

$$R_2 = \frac{R_a \cdot R_b}{R_a + R_b + R_a} = \frac{10\Omega \cdot 6\Omega}{10\Omega + 2\Omega + 6\Omega} = 3,333\Omega$$

$$R_3 = \frac{R_a \cdot R_b}{R_a + R_b + R_a} = \frac{10\Omega \cdot 2\Omega}{10\Omega + 2\Omega + 6\Omega} = 1,111\Omega$$

$$R = 0,666\Omega + \frac{(1,111\Omega + 3\Omega)(3,333\Omega + 4\Omega)}{(1,111\Omega + 3\Omega) + (3,333\Omega + 4\Omega)} = 0,666\Omega + 2,634\Omega = 3,3\Omega$$

1.22. Rangkuman

- Listrik elektrostatik terdapat disekitar kita, memiliki dua muatan, yaitu elektrostatis bermuatan positif dan yang bermuatan negatif.
- Muatan positif mengandung proton dan muatan negatif dibawa oleh elektron.
- Satuan muatan dinyatakan dengan "Coulomb" dengan symbol C. Muatan proton mengandung $+1 \times 10^{-19}$ C dan muatan electron mengandung -1×10^{-19} C.
- Elektrostatis yang muatannya bertanda sama akan saling tolak menolak, sedangkan yang muatannya bertanda berlainan saling tarik menarik.
- Alat untuk membangkitkan listrik elektrostatis disebut generator elektrostatis *Van De Graaff*.
- Tegangan atau beda potensial antara dua titik adalah usaha yang dibutuhkan untuk membawa muatan satu Coulomb dari satu titik ke titik lainnya.
- Satuan tegangan listrik dinyatakan dalam satuan Volt (V), alat ukur tegangan listrik disebut Voltmeter.

- Prinsip pembangkitan tegangan listrik, dikenal *prinsip elektromagnetis, prinsip elektrokimia, prinsip thermo elemen, prinsip photo-elemen dan prinsip piezo-kristal*.
- Voltmeter sebagai pengukur tegangan listrik disambungkan secara paralel dengan sumber tegangan.
- Saat melakukan pengukuran tegangan harus diperhatikan batas ukur dan pembacaan skala pengukuran
- Arus listrik bergerak dari terminal positif ke terminal negatif dalam loop tertutup, aliran listrik terjadi karena adanya beda potensial antara terminal positif dan terminal negatif.
- Satu Amper adalah sejumlah aliran arus yang memuat electron satu coulomb dimana muatan bergerak kesuatu titik dalam satu detik.
- Logam adalah penghantar listrik yang baik, tiap logam memiliki jumlah atom yang berbeda, sehingga ada logam yang mudah mengalirkan arus listrik atau memiliki sifat konduktivitas yang tinggi.
- Arus listrik diukur dengan satuan Amper, alat ukur untuk mengukur arus listrik disebut *Ampermeter*.
- *Ampermeter* dihubungkan secara seri dengan beban listrik, saat pengukuran harus memperhatikan batas ukur dan skala pengukuran.
- Kerapatan arus adalah kerapatan arus yang melalui suatu penampang penghantar dalam satuan amper per mm^2 . Kerapatan arus berpengaruh pada pemanasan kabel.
- Tahanan penghantar (R) berbanding terbalik dengan konduktivitas (G). Konduktivitas (G) berbanding terbalik dengan tahanan konduktor(R).
- Hukum Ohm menyatakan bahwa tegangan (V) perkalian antara besarnya arus (I) dengan tahanan (R), secara matematis $V = I.R$.
- Tahanan kawat penghantar (R) berbanding lurus dengan tahanan jenis kawat (ρ) dan panjang kawat (L), dan berbanding terbalik dengan penampang kawat (A), dituliskan $R = \rho \cdot L/A (\Omega)$.
- Tahanan kawat juga dipengaruhi oleh temperatur, ketika temperatur naik, ikatan atom meningkat, mengakibatkan aliran elektron terhambat, akibatnya tahanan kawat akan meningkat juga.
- Resistor banyak dipakai pada aplikasi teknik elektronika, ada dua jenis terbuat dari bahan arang dan terbuat dari belitan kawat.
- Besarnya resistansi ditentukan dengan kode warna yang diurutkan dari warna hitam (0), coklat (1), merah (2) orange (3), kuning (4), hijau (5), biru (6), ungu (7), abu-abu (8) dan putih (9).
- Hubungan seri Resistor, besarnya tahanan total (R_t) adalah penjumlahan dari masing-masing Resistor ($R_1 \dots R_n$). Secara matematis dituliskan $R_t = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$.
- Hubungan paralel Resistor, besarnya tahanan pengganti (R_p) adalah penjumlahan dari perbandingan terbalik masing-masing Resistor ($1/R_1 \dots 1/R_n$). Secara matematis $1/R_p = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots + 1/R_n$.
- Hukum Kirchoff tegangan menyatakan bahwa dalam loop tertutup jumlah aljabar tegangan dalam cabang tertutup hasilnya nol.

- Hukum Kirchoff arus menyatakan bahwa dalam rangkaian loop tertutup, jumlah arus yang masuk dalam suatu titik sama dengan jumlah arus yang keluar dari titik tersebut.
- Mengukur resistansi dapat dilakukan dengan metode Volt-Ampermeter. Pertama Voltmeter dipasang dekat dengan sumber tegangan, cara kedua Voltmeter dipasang dekat dengan beban.
- Tahanan dalam catu daya dapat diukur dengan menggunakan metode Volt-Ampermeter.
- Rangkaian ekivalen catudaya dapat dinyatakan dengan dua cara, yaitu pertama rangkaian ekivalen sumber tegangan, kedua rangkaian ekivalen sumber arus.
- Hubungan Resistor yang komplek dapat dianalisis dengan cara konversi hubungan segitiga ke bintang, atau sebaliknya dari hubungan bintang ke segitiga,
- Hubungan seri baterai menghasilkan tegangan total adalah penjumlahan tegangan masing-masing baterai. $V_t = v_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n$.
- Hubungan Paralel baterai menghasilkan jumlah arus total merupakan jumlah arus masing-masing baterai. $I_{total} = I_b1 + I_b2 + I_b3 + \dots + I_{bn}$.

1.23. Soal-soal

1. Muatan listrik -5C, hitung jumlah elektron didalamnya
2. Jelaskan prinsip kerja generator elektrostatis Van De Graff
3. Jika diperlukan usaha 100 Joule untuk setiap memindahkan muatan sebesar 10 Coulomb. Hitung tegangan yang ditimbulkan ?
4. Gambarkan rangkaian dan cara kerja trafo stepdown dari 220 VAC menjadi tegangan DC 12 Volt DC dan 6 Volt DC.
5. Ada lima prinsip pembangkitan listrik, yaitu prinsip generator, elektrokimia, thermo elemen, foto elemen dan piezo-kristal. Jelaskan cara kerja dari masing-masing.
6. Tunjukkan cara mengukur tegangan DC sebuah akumulator 12Volt, tunjukkan cara pengukuran dengan Voltmeter yang benar.
7. Tunjukkan cara mengukur Arus DC sebuah akumulator 12Volt, tunjukkan cara pengukuran dengan Ampermeter yang benar, dengan beban lampu 100 Watt/12V.
8. Muatan sebanyak 0,50 Coulomb bergerak dalam 2 detik. hitung besarnya arus, dan jumlah elektron ?
9. Arus listrik 2 A, mengalir kawat penampang 1 mm^2 . Hitung a) kerapatan arusnya b) jika dilewatkan kawat diameter 0,02 mm hitung penampang kawatnya dan kerapatan arusnya.
10. Kawat pengantar memiliki resistansi $R = 5\Omega, 10\Omega, 15\Omega$. Hitung besarnya konduktivitasnya
11. Resistor dihubungkan dengan sumber tegangan listrik
 - d) Resistor 10Ω dipasang baterai 12 V. Hitung arus yang mengalir ?
 - e) Resistor 100Ω dialiri arus $0,6A$. Hitung tegangannya ?

- f) Tegangan 220V, dipasang beban dan mengalir arus 0,1 A. Hitung besarnya resistansi beban ?
12. Penghantar tembaga (Cu) berpenampang 4 mm^2 , panjang 100 m, tahanan jenis tembaga $0,0178\Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Hitung tahanan penghantar tersebut.
13. Penghantar kuningan pada temperatur 20°C memiliki tahanan 100Ω , penghantar tersebut dalam lingkungan yang panasnya mencapai 80°C . Hitunglah tahanan penghantar pada temperatur 80°C ?
14. Sebuah Resistor tertera warna : merah, ungu, kuning, emas. Tentukan nilai resistansinya ?
15. Lima buah Resistor terhubung seri, yaitu 27Ω , 47Ω , 27Ω , 100Ω dan 69Ω . Hitung besarnya tahanan pengganti (R_p).
16. Empat buah Resistor terhubung paralel, yaitu 10Ω , 15Ω , 30Ω dan 40Ω . Hitung besarnya tahanan pengganti (R_p).
17. Sumber tegangan DC 12V, dirangkai dengan empat Resistor 10Ω , 27Ω , 48Ω dan $X\Omega$. Hitunglah besarnya Resistor X dengan menggunakan hukum Kirchoff tegangan jika arus yang mengalir 85mA .
18. Pembagi tegangan (*voltage devider*), dua buah Resistor $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_2=82\text{k}\Omega$ di berikan tegangan baterai 12V. Hitung besarnya tegangan pembagi diujung R_2 ?
19. Sumber tegangan DC, dirangkai dengan tiga Resistor paralel. Arus cabang-1: 15mA , arus cabang-2 : 20mA , arus cabang-3 : 30mA Hitunglah besarnya arus total sumber DC dengan menggunakan hukum Kirchoff arus ?
20. Sumber tegangan DC 10V, dirangkai tiga Resistor paralel $R_1=1,5\text{k}\Omega$ $R_2=2,4\text{k}\Omega$ $R_3=4,8\text{k}\Omega$. Hitung besarnya arus cabang masing masing Resistor dan arus total sumber ?

BAB 2

KEMAGNETAN DAN ELEKTROMAGNETIS

Daftar Isi :

2.1	Prinsip Kemagnetan	2-2
2.2	Fluksi Medan Magnet	2-7
2.3	Kuat Medan Magnet	2-8
2.4	Kerapatan Fluk Magnet.....	2-9
2.5	Bahan Ferromagnet.....	2-10
2.6	Rangkaian Magnetik	2-14
2.7	Aplikasi Kemagnetan & Elektromagnet.....	2-16
2.8	Rangkuman	2-23
2.9	Soal-soal.....	2-25

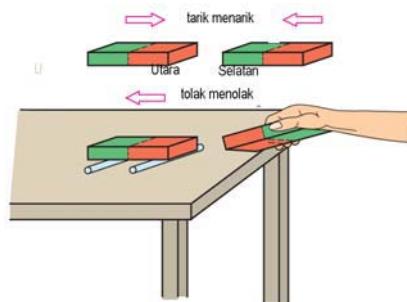
2.1. Prinsip Kemagnetan

Magnet yang kita lihat sehari-hari jika didekatkan dengan besi, maka besi akan menempel. Magnet memiliki dua kutub, kutub utara dan kutub selatan. Magnet memiliki sifat pada kutub berbeda saat didekatkan akan saling tarik menarik (utara - selatan). Tapi jika kutub berbeda didekatkan akan saling tolak-menolak (utara-utara atau selatan-selatan) **gambar-2.1**.

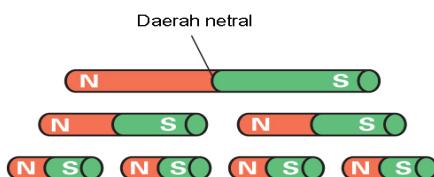
Batang magnet dibagian tengah antara kutub utara-kutub selatan, disebut bagian netral **gambar-2.2**. Bagian netral magnet artinya tidak memiliki kekuatan magnet. Magnet bisa dalam ujud yang besar, sampai dalam ukuran terkecil sekalipun. Batang magnet panjang, jika dipotong menjadi dua atau dipotong menjadi empat bagian akan membentuk kutub utara-selatan yang baru.

Untuk membuktikan bahwa daerah netral tidak memiliki kekuatan magnet. Ambil beberapa sekrup besi, amatilah tampak sekrup besi akan menempel baik diujung kutub utara maupun ujung kutub selatan **gambar-2.3**. Daerah netral dibagian tengah sekrup tidak akan menempel sama sekali, dan sekrup akan terjatuh.

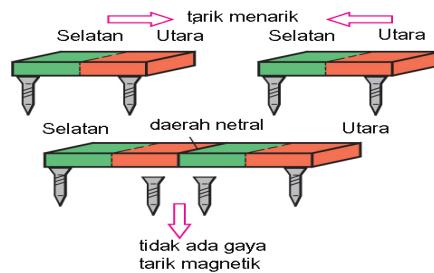
Mengapa besi biasa berbeda logam magnet ? Pada besi biasa sebenarnya terdapat kumpulan magnet-magnet dalam ukuran mikroskopik, tetapi posisi masing-masing magnet tidak beraturan satu dengan lainnya sehingga saling menghilangkan sifat kemagnetannya **gambar-2.4a**.



Gambar 2.1 : Sifat magnet saling tarik menarik, tolak-menolak



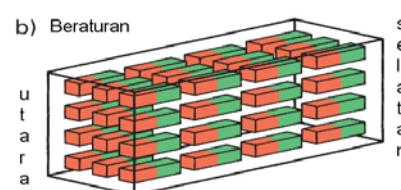
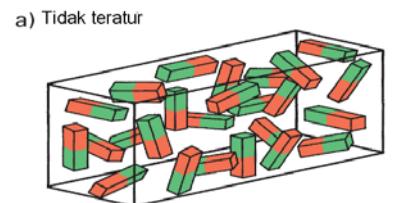
Gambar 2.2 : Kutub utara-selatan magnet permanen



Gambar 2.3 : Daerah netral pada magnet permanen

Pada magnet sebenarnya kumpulan jutaan magnet ukuran mikroskopik yang teratur satu dan lainnya **gambar-4b**. Kutub utara dan kutub selatan magnet posisinya teratur. Secara keseluruhan kekuatan magnetnya menjadi besar.

Logam besi bisa menjadi magnet secara permanen atau sementara dengan cara induksi elektromagnetik. Tetapi ada beberapa logam yang tidak bisa menjadi magnet, misalnya tembaga, aluminium logam tersebut dinamakan *diamagnetik*.

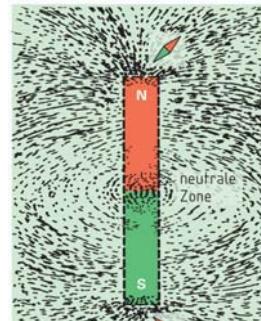


Gambar 2.4 : Perbedaan besi biasa dan magnet permanen

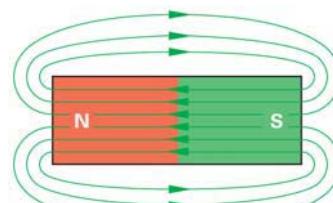
2.1.1. Garis Gaya Magnet

Bumi merupakan magnet alam raksasa, buktinya mengapa kompas menunjukkan arah utara dan selatan bumi kita. Karena sekeliling bumi sebenarnya dilingkupi garis gaya magnet yang tidak tampak oleh mata kita tapi bisa diamati dengan kompas keberadaannya.

Batang magnet memancarkan garis gaya magnet yang melingkupi dengan arah dari utara ke selatan. Pembuktian sederhana dilakukan dengan menempatkan batang magnet diatas selembar kertas. Diatas kertas taburkan serbuk halus besi secara merata, yang terjadi adalah bentuk garis-garis dengan pola-pola melengkung oval diujung-ujung kutub **gambar-2.5**. Ujung kutub utara-selatan muncul pola garis gaya yang kuat. Daerah netral pola garis gaya magnetnya lemah.



Gambar 2.5 : Pola garis medan magnet permanen

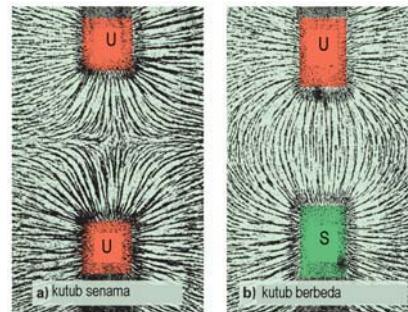


Gambar 2.6 : Garis medan magnet utara-selatan

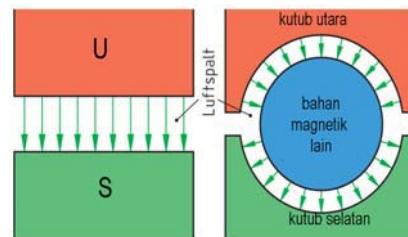
Arah garis gaya magnet dengan pola garis melengkung mengalir dari arah kutub utara menuju kutub selatan **gambar-2.6**. Didalam batang magnet sendiri garis gaya mengalir sebaliknya, yaitu dari kutub selatan ke kutub utara. Didaerah netral tidak ada garis gaya diluar batang magnet.

Pembuktian secara visual garis gaya magnet untuk sifat tarik-menarik pada kutub berbeda dan sifat tolak-menolak pada kutub sejenis dengan menggunakan magnet dan serbuk halus besi **gambar-2.7**. Tampak jelas kutub sejenis utara-utara garis gaya saling menolak satu dan lainnya. Pada kutub yang berbeda utara-selatan, garis gaya magnet memiliki pola tarik menarik. Sifat saling tarik menarik dan tolak menolak magnet menjadi dasar bekerjanya motor listrik.

Untuk mendapatkan garis gaya magnet yang merata disetiap titik permukaan maka ada dua bentuk yang mendasari rancangan mesin listrik. Bentuk datar (*flat*) akan menghasilkan garis gaya merata setiap titik permukaannya. Bentuk melingkar (*radial*), juga menghasilkan garis gaya yang merata setiap titik permukaannya **gambar-2.8**.



Gambar 2.7 : pola garis medan magnet tolak menolak dan tarik menarik

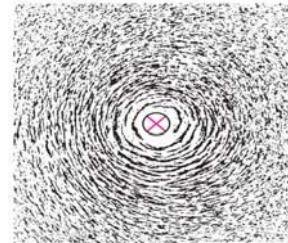


Gambar 2.8 : Garis gaya magnet pada permukaan rata dan silinder

2.1.2. Elektromagnet

Elektromagnet adalah prinsip pembangkitan magnet dengan menggunakan arus listrik. Aplikasi praktisnya kita temukan pada pita tape recorder, motor listrik, speaker, relay dsb. Sebatang kawat yang diberikan listrik DC arahnya meninggalkan kita (tanda silang), maka disekeliling kawat timbul garis gaya magnet melingkar **gambar-2.9**.

Gambar visual garis gaya magnet didapatkan dari serbuk besi yang ditaburkan disekeliling kawat beraliran listrik.



Gambar 2.9 : Prinsip elektromagnetik

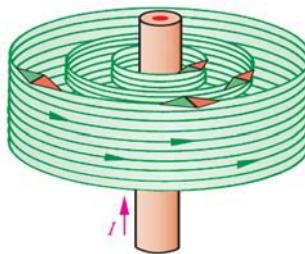
Sebatang kawat posisi vertikal diberikan arus listrik DC searah panah, arus menuju keatas arah pandang (tanda titik). Garis gaya magnet yang membentuk selubung berlapis lapis terbentuk sepanjang kawat **gambar-2.10**. Garis gaya magnet ini tidak tampak oleh mata kita, cara melihatnya dengan serbuk halus besi atau kompas yang didekatkan dengan kawat penghantar tsb. Kompas menunjukkan bahwa arah garis gaya sekitar kawat melingkar.

Arah medan magnet disekitar penghantar sesuai arah putaran sekrup (James Clerk Maxwell, 1831-1879) **gambar-2.11**. arah arus kedepan (meninggalkan kita) maka arah medan magnet searah putaran sekrup kekanan. Sedangkan bila arah arus kebelakang (menuju kita) maka arah medan magnet adalah kekiri.

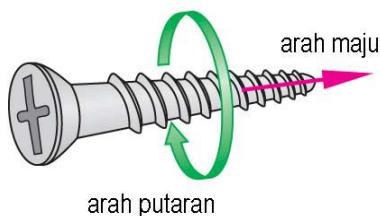
Aturan sekrup mirip dengan hukum tangan kanan yang menggenggam, arah ibu jari menyatakan arah arus listrik mengalir pada kawat. Maka keempat arah jari menyatakan arah dari garis gaya elektromagnet yang ditimbulkan.

Arah aliran arus listrik DC pada kawat penghantar menentukan arah garis gaya elektromagnet. Arah arus listrik DC menuju kita (tanda titik pada penampang kawat), arah garis gaya elektromagnet melingkar berlawanan arah jarum jam **gambar-2.12**.

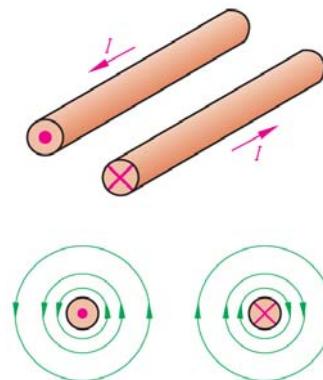
Ketika arah arus listrik DC meninggalkan kita (tanda silang penampang kawat), garis gaya elektromagnet yang ditimbulkan melingkar searah dengan jarum jam (sesuai dengan model mengencangkan sekrup). Makin besar intensitas arus yang mengalir semakin kuat medan elektromagnet yang mengelilingi sepanjang kawat tersebut.



Gambar 2.10 : Garis magnet membentuk selubung seputar kawat berarus



Gambar 2.11 : Prinsip putaran sekrup



Gambar 2.12 : Elektromagnetik sekeliling kawat

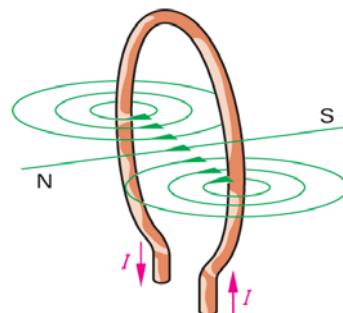
2.1.3. Elektromagnet pada Belitan Kawat

Kawat penghantar bentuk bulat dialiri arus listrik I sesuai arah panah **gambar-2.13**. Hukum tangan kanan dalam kasus ini, disekeliling kawat timbul garis gaya magnet yang arahnya secara gabungan membentuk kutub utara dan kutub selatan. Makin besar arus listrik yang melewati kawat makin kuat medan elektromagnetik yang ditimbulkannya.

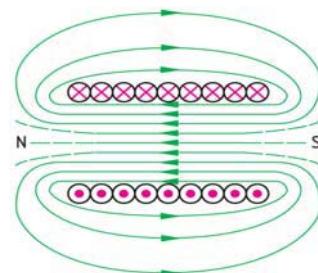
Jika beberapa belitan kawat digulungkan membentuk sebuah coil, jika dipotong secara melintang maka arah arus ada dua jenis. Kawat bagian atas bertanda silang (meninggalkan kita) dan kawat bagian bawah bertanda titik (menuju kita) **gambar-2.14**. Hukum tangan kanan empat jari menyatakan arah arus I , arah ibu jari menunjukkan kutub utara magnet.



Gambar 2.15 : Hukum tangan kanan



Gambar 2.13 : Kawat melingkar berarus membentuk kutub magnet



Gambar 2.14 : Belitan kawat membentuk kutub magnet

Hukum tangan kanan untuk menjelas kan terbentuknya garis gaya elektromagnet pada sebuah gulungan coil **gambar-2.15**. Sebuah gulungan kawat coil dialiri arus listrik arahnya sesuai dengan empat jari tangan kanan, kutub magnet yang dihasilkan dimana kutub utara searah dengan ibu jari dan kutub selatan arah lainnya. Untuk menguatkan medan magnet yang dihasilkan pada gulungan dipasangkan inti besi dari bahan ferromagnet, sehingga garis gaya elektromagnet menyatu. Aplikasinya dipakai pada coil kontaktor atau relay.

2.2. Fluksi Medan Magnet

Medan magnet tidak bisa kasat mata namun buktinya bisa diamati dengan kompas atau serbuk halus besi. Daerah sekitar yang ditembus oleh garis gaya magnet disebut gaya medan magnetik atau medan magnetik. Jumlah garis gaya dalam medan magnet disebut fluksi magnetik **gambar-2.16**

Menurut satuan internasional besaran fluksi magnetik (Φ) diukur dalam Weber, disingkat Wb yang didifinisikan : "Suatu medan magnet serba sama mempunyai fluksi magnetik sebesar 1 weber bila sebatang pengantar dipotongkan pada garis-garis gaya magnet tsb selama satu detik akan menimbulkan gaya gerak listrik (ggl) sebesar satu volt".

$$\text{Weber} = \text{Volt} \times \text{detik}$$

$$[\Phi] = 1 \text{ Vdetik} = 1 \text{ Wb}$$

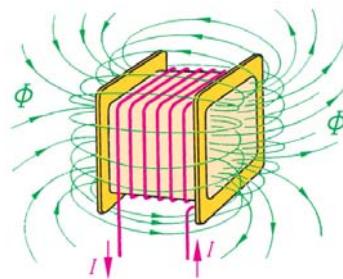
Belitan kawat yang dialiri arus listrik DC maka didalam inti belitan akan timbul medan magnet yang mengalir dari kutub utara menuju kutub selatan.

Pengaruh gaya gerak magnetik akan melingkupi daerah sekitar belitan yang diberikan warna arsir **gambar-2.17**. Gaya gerak magnetik (Θ) sebanding lurus dengan jumlah belitan (N) dan besarnya arus yang mengalir (I), secara singkat kuat medan magnet sebanding dengan amper-lilit.

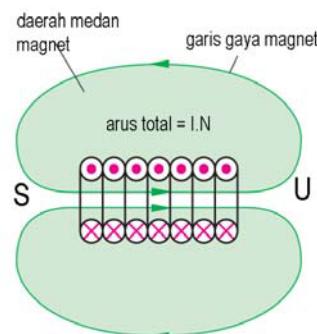
$$\Theta = I \cdot N \quad [\Theta] = \text{Amper-turn}$$

- Θ Gaya gerak magnetik
- I Arus mengalir ke belitan
- N Jumlah belitan kawat

Contoh : Belitan kawat sebanyak 600 lilit, dialiri arus 2 A. Hitunglah a) gaya gerak magnetiknya b) jika kasus a) dipakai 1200 lilit berapa besarnya arus ?



Gambar 2.16 : Belitan kawat berinti udara



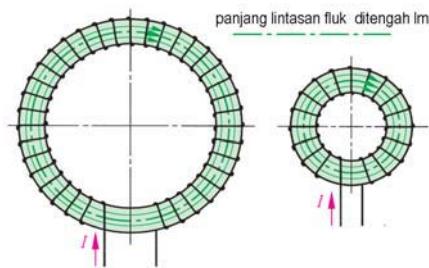
Gambar 2.17 : Daerah pengaruh medan magnet

Jawaban :

- a) $\Theta = I \cdot N = 600 \text{ lilit} \times 2 \text{ A} = 1.200 \text{ Amper-lilit}$
- b) $I = \Theta/N = 1.200 \text{ Amper-lilit}/1200 \text{ lilit} = 1 \text{ Amper.}$

2.3. Kuat Medan Magnet

Dua belitan berbentuk toroida dengan ukuran yang berbeda diameternya **gambar-2.18**. Belitan toroida yang besar memiliki diameter lebih besar, sehingga keliling lingkarannya lebih besar. Belitan toroida yang kecil tentunya memiliki keliling lebih kecil. Jika keduanya memiliki belitan (N) yang sama, dan dialirkan arus (I) yang sama maka *gaya gerak magnet* ($\Theta = N \cdot I$) juga sama. Yang akan berbeda adalah *kuat medan magnet* (H) dari kedua belitan diatas.



Gambar 2.18 : Medan magnet pada toroida

Persamaan kuat medan magnet

$$H = \frac{\Theta}{l_m} = \frac{I \cdot N}{l_m} \quad [H] = \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

- | | |
|----------|--------------------------|
| H | Kuat medan magnet |
| l_m | Panjang lintasan |
| Θ | Gaya gerak magnetik |
| I | Arus mengalir ke belitan |
| N | Jumlah belitan kawat |

Contoh : Kumparan toroida dengan 5000 belitan kawat, panjang lintasan magnet 20cm, arus yang mengalir sebesar 100mA. Hitung besarnya kuat medan magnetiknya

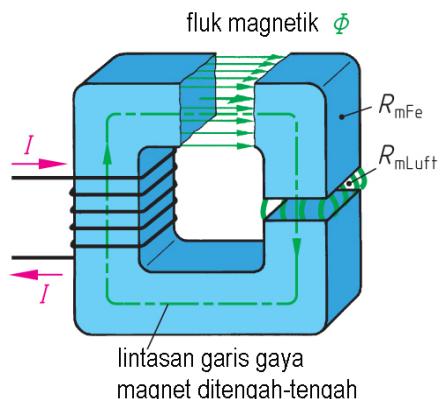
Jawaban :

$$H = \frac{I \cdot N}{l_m} = \frac{0,1 \text{ A} \cdot 5000}{0,2 \text{ m}} = 2.500 \text{ A/m}$$

2.4. Kerapatan Fluk Magnet

Efektivitas medan magnetik dalam pemakaian sering ditentukan oleh besarnya “kerapatan fluk magnet”, artinya fluk magnet yang berada pada permukaan yang lebih luas kerapatannya rendah dan intensitas medannya lebih lemah **gambar-2.19**. Pada permukaan yang lebih sempit kerapatan fluk magnet akan kuat dan intensitas medannya lebih tinggi.

Kerapatan fluk magnet (B) atau induksi magnetik didefinisikan sebagai fluk persatuan luas penampang. Satuan fluk magnet adalah Tesla.



Gambar 2.19 : Kerapatan fluk magnet

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad [B] = \frac{V \cdot s}{m^2} = \frac{Wb}{m^2} = T$$

- B Kerapatan medan magnet
- Φ Fluk magnet
- A Penampang inti

Contoh : Belitan kawat bentuk inti persegi 50mm x 30 mm, menghasilkan kuat medan magnet sebesar 0,8 Tesla. Hitung besar fluk magnetnya.

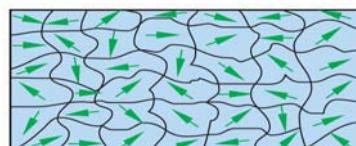
Jawaban :

$$B = \frac{\Phi}{A} \Rightarrow \Phi = B \cdot A = 0,08T \times 0,05\text{ m} \times 0,03\text{ m} = 1,2\text{ mWb}$$

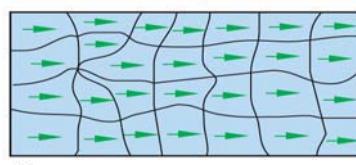
2.5. Bahan Ferromagnet

Bahan ferromagnet dipakai sebagai bahan inti dalam transformator, stator motor. Susunan molekul bahan ferromagnet terbentuk dari bagian-bagian kecil disebut "domain" **gambar-2.20**.

Setiap domain merupakan *magnet dipole elementer* dan mengandung 10^{12} sampai 10^{15} atom. Bila bahan *ferromagnetik* mendapat pengaruh medan magnet luar, dengan segera masing-masing melekul membentuk kutub yang searah.



a) magnetisasi
↓

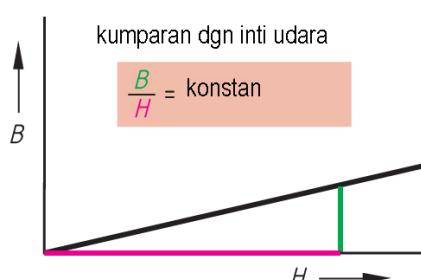


Gambar 2.20 : Bahan ferromagneik

2.5.1. Permeabilitas

Permeabilitas atau "daya hantar magnetik (μ)" adalah kemampuan bahan media untuk dilalui fluk magnet. Ada tiga golongan media magnet yaitu ferromagnet, paramagnet dan diamagnet.

Ferromagnet mudah dijadikan magnet dan menghasilkan medan magnet yang kuat, memiliki daya hantar magnetik yang baik. Contohnya : besi, baja, nikel, cobal serta campuran beberapa logam seperti *Alnico* dan *permalloy*.



Gambar 2.21 :Kurva BH inti udara

Paramagnet kurang baik untuk dijadikan magnet, hasilnya lemah dan permeabilitasnya kurang baik. Contohnya : *aluminium, platina, mangan, chromium*.

Diamagnet bahan yang lemah sebagai magnet dan berlawanan, permeabilitas nya dibawah paramagnet. Contohnya: *bismuth, antimonium, tembaga, seng, emas dan perak*.

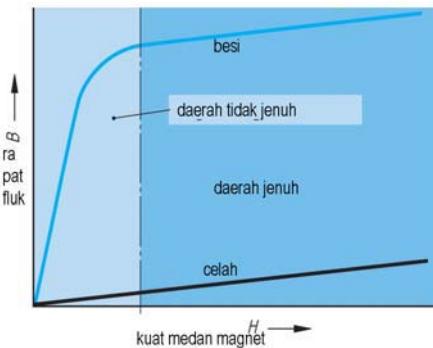
Kurva BH mengandung informasi yang berhubungan dengan permeabilitas suatu bahan. Satuan permeabilitas Wb/Am . Permeabilitas hampa udara diperoleh dari perbandingan antara kerapatan fluk dan kuat medan magnet **gambar-2.21**.

Persamaan permeabilitas hampa udara:

$$\mu_0 = \frac{B}{H} \quad [\mu_0] = \frac{\frac{Vs}{m^2}}{\frac{A}{m}} = \frac{Vs}{Am} = \text{Wb/Am}$$

$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Wb/Am}$$

μ_0 Permeabilitas hampa udara
 B Fluk magnet
 H Kerapatan magnet



Gambar 2.22 : Kurva BH ferromagnetik

Permeabilitas untuk bahan magnet sifatnya tidak konstan, selalu diperbandingkan terhadap permeabilitas hampa udara, dimana perbandingan tersebut disebut permeabilitas relatif **gambar-2.22**.

Persamaan permeabilitas bahan magnet :

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \Rightarrow \mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \text{Wb/Am}$$

μ Permeabilitas bahan
 μ_0 Permeabilitas hampa udara
 μ_r Permeabilitas relatif

Contoh : Belitan kawat rongga udara memiliki kerapatan 2.500 A/m, Hitung besar fluk magnetnya, bila diketahui $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Wb/Am.

Jawaban :

$$B = \mu_0 \cdot H$$

$$B = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Wb/Am} \cdot 2500 \text{ A/m} = 0,00314 \text{ T} = 3,14 \text{ mT}$$

Contoh : Besi toroid mempunyai keliling 0,3 meter dan luas penampang 1 cm². Toroida dililitkan kawat 600 belitan dialiri arus sebesar 100mA. Agar diperoleh fluk magnet sebesar 60 μ Wb pada toroida tsb. Hitung a) kuat medan magnet b) kerapatan fluk magnet c) permeabilitas absolut dan d) permeabilitas relatif besi.

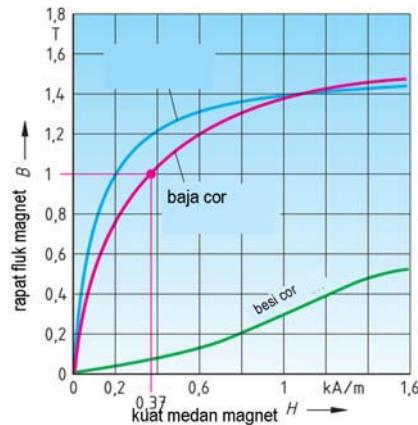
Jawaban :

- Kuat medan magnet $H = \frac{I \cdot N}{l_m} = \frac{600 \text{t} \cdot 0,1 \text{A}}{0,3 \text{m}} = 200 \text{ A/m}$
- Kerapatan fluk magnet $B = \frac{\Phi}{A} = \frac{60 \cdot 10^{-6}}{1,0 \cdot 10^{-4}} = 0,6 \text{ T}$
- Permeabilitas absolut/bahan $\mu_0 = \frac{B}{H} = \frac{0,6}{200} = 0,003 \text{ Wb/Am}$
- Permeabilitas relatif $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{0,003}{1,257 \times 10^{-8}} = 2.400$

2.5.2. Kurva Magnetisasi

Faktor penting yang menentukan perubahan permeabilitas bahan adalah : jenis bahan dan besarnya gaya gerak magnetik yang digunakan.

Berdasarkan kurva magnetisasi **gambar-2.23** untuk mendapatkan kerapatan fluk 1 Tesla diperlukan kuat medan magnet 370 A/m. Jika kerapatan fluk dinaikkan 1,2 Tesla diperlukan kuat medan magnet 600 A/m.



Gambar 2.23 : Kurva magnetisasi

Tabel 2.1 Permeabilitas

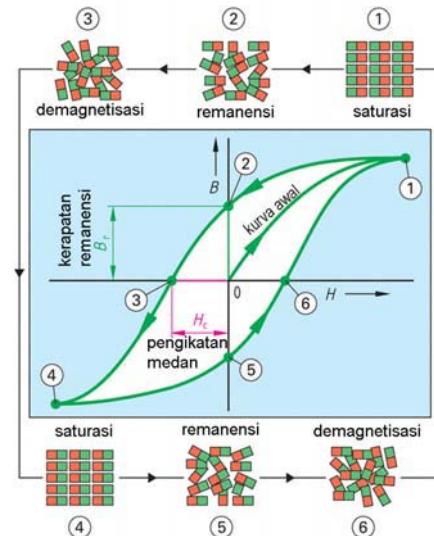
Media	μ_r
Hampa udara	$\mu_r = 1$
Udara	$\mu_r \approx 1$
Paramagnetik , Aluminium, Krom	$\mu_r > 1$
Ferromagnetik, Besi, Nikel	$\mu_r \geq 1, \dots 10^5$
Diamagnetik, tembaga	$\mu_r < 1$

Berikutnya kerapatan fluk 1,4 Tesla diperlukan kuat medan 1.000 A/m. Kesimpulannya grafik magnet bukan garis linier, tapi merupakan garis lengkung pada titik tertentu menuju titik kejemuhan.

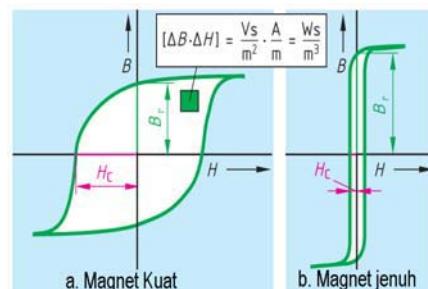
2.5.3. Kurva Histerisis

Batang besi yang momen magnetiknya nol akan dilihat perilaku hubungan antara kerapatan fluk magnet (B) dengan kuat medan magnet (H) **gambar-2.24**.

1. Diawali H dinaikkan dari titik (0) sampai titik (1), nilai B konstan mencapai kejenuhan sifat magnet sempurna.
2. Kemudian H diturunkan sampai titik (0), ternyata nilai B berhenti di (2) disebut titik "magnet remanensi".
3. Agar B mencapai titik (0) di angka (3) diperlukan medan kuat medan magnetic H_c , disebut "magnet koersif", diukur dari sifat kekerasan bahan dalam ketahanannya menyimpan magnet.
4. Kemudian H dinaikkan dalam arah negatif, diikuti oleh B dengan polaritas berlawanan sampai titik jenuhnya(4)
5. Selanjutnya H diturunkan ke titik (0), ternyata B masih terdapat kerapatan fluk remanen (5).
6. Terakhir H dinaikkan arah positif, dikuti oleh B melewati titik (6), disini lengkap satu loop histerisis.



Gambar 2.24 : Kurva histeresis



Gambar 2.25 :Histeresis magnet permanen-ferromagnetik

Tiga sifat bahan dari pembahasan diatas adalah : permeabilitas, *remanensi* dan *koersivity*. Bahan yang cocok untuk magnet permanen adalah yang *koersivity* dan *remanensi* yang tinggi **gambar-2.25a**. Bahan yang cocok untuk elektromagnetik adalah yang permeabilitasnya dan kejenuhannya dari kerapatan fluk magnet yang tinggi, tetapi koersivitasnya rendah **gambar-2.25b**.

2.6. Rangkaian Magnetik

Rangkaian magnetik terdiri beberapa bahan magnetik yang masing-masing memiliki permeabilitas dan panjang lintasan yang tidak sama. Maka setiap bagian mempunyai reluktansi yang berbeda pula, sehingga reluktansi total adalah jumlah dari reluktansi masing-masing bagian.

Inti besi yang berbentuk mirip huruf C dengan belitan kawat dan mengalir arus listrik I , terdapat celah sempit udara yang dilewati garis gaya magnet **gambar-2.26**. Rangkaian ini memiliki dua reluktansi yaitu reluktansi besi R_{mFe} dan reluktansi celah udara $R_{m\text{ udara}}$.

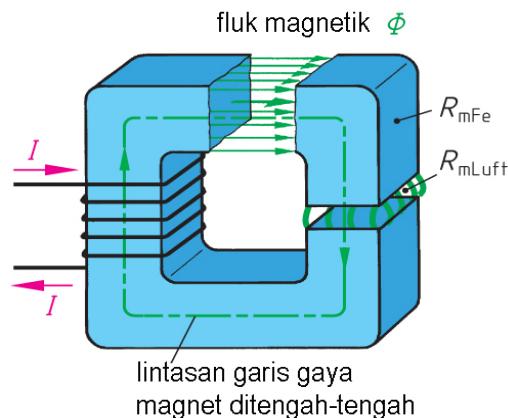
Persamaan reluktansi :

$$R_m = \frac{l_m}{\mu \cdot A} = \frac{\Theta}{\Phi} \quad [R_m] = \frac{A}{Vs}$$

$$R_m = R_{m\text{ Fe}} + R_{m\text{ Luft}}$$

$$\Theta = \Theta_{Fe} + \Theta_{Luft}$$

$$\Theta = H_{Fe} \cdot l_{Fe} + H_{Luft} \cdot l_{Luft}$$



Gambar 2.26 :
Rangkaian magnetik

Contoh : Berdasarkan **gambar-2.26** luas penampang inti 66,6 cm² dan fluk magnetnya 8 mWb. Panjang lintasan inti besi 100 cm, jarak celah udara 6 mm. Hitung a) kerapatan fluk magnet pada inti besi dan tentukan besarnya gaya gerak magnet. b) Hitung besarnya gaya gerak magnet total

Jawaban :

$$\text{a)} \quad B = \frac{\Phi}{A} = \frac{8\text{mWb}}{66,6\text{cm}^2} = \frac{0,008\text{Wb}}{0,0066\text{m}^2} = 1,20 \text{ Tesla}$$

Berdasarkan grafik kurva jika $B = 1,2$ Tesla, diperlukan kuat medan magnet $H = 600 \text{ A/m}$.

Besarnya gaya gerak magnet pada inti besi:

$$\Theta_{Fe} = H_{Fe} \cdot I_{Fe} = 600 \text{ A/m} \times 1 \text{ m} = \mathbf{600 \text{ A}}$$

b) $B = \mu_0 \cdot H_L \Rightarrow H_L = \frac{1,20T}{1,257 \cdot 10^{-6} Vs / (Am)} = \mathbf{0,95 \cdot 10^6 \text{ A/m}}$

$$\Theta_L = H_L \cdot I_L = 0,95 \cdot 10^6 \frac{A}{m} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \text{ m} = \mathbf{5700 \text{ A}}$$

c) $\Theta = \Theta_{Fe} + \Theta_L = 600 \text{ A} + 5700 \text{ A} = \mathbf{6300 \text{ A}}$

Tabel 2.2. Parameter dan rumus kemagnetan

Parameter	Simbol	Rumus	Satuan
Gaya gerak magnetik	Θ	$\Theta = I \cdot N$	Amper lilit
Kuat medan magnet	H	$H = \frac{I \cdot N}{lm} = \frac{\Theta}{lm}$	$\frac{A}{m} = Wb/A$
Fluk Magnet	Φ	$\Phi = B \cdot A$	$Wb = Vs$
Kerapatan medan magnet	B	$B = \frac{\Phi}{A} = \mu \cdot H$	$\frac{Wb}{m^2} = \frac{Vs}{m^2} = Tesla$
Permeabilitas	μ	$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = \frac{B}{H}$	$\frac{Vs}{Am} = \frac{Wb}{Am} = \frac{\Omega s}{m}$
Permeabilitas hampa	μ_0	$1,257 \cdot 10^{-6}$	$\frac{Vs}{Am} = \frac{Wb}{Am} = \frac{\Omega s}{m}$
Reluktansi	R_m	$R_m = \frac{\Theta}{\Phi} = \frac{l_m}{\mu \cdot A}$	$\frac{A}{Vs} = \frac{A}{Wb} = \frac{1}{\Omega s}$

2.7. Aplikasi Kemagnetan & Elektromagnet

2.7.1. Prinsip Kerja Motor Listrik DC.

Prinsip motor listrik bekerja berdasarkan hukum tangan kiri *Fleming*. Sebuah kutub magnet berbentuk U dengan kutub utara-selatan memiliki kerapatan fluk magnet Φ **gambar-2.27**.

Sebatang kawat pengantar digantung bebas dengan kabel fleksibel. Di ujung kawat dialirkan arus listrik DC dari terminal + arus I mengalir ke terminal negatif.

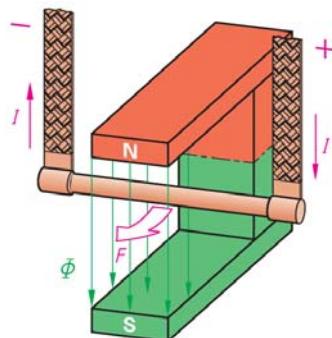
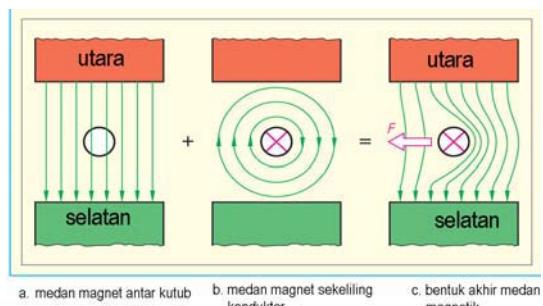
Yang terjadi adalah kawat bergerak arah panah akan mendapatkan gaya sebesar F . Gaya yang ditimbulkan sebanding dengan besarnya arus I .

Jika polaritas aliran listrik dibalik positif dan negatifnya, maka kawat akan bergerak kearah berlawanan panah F .

$$F = B \cdot L \cdot I$$

F	gaya mekanik	(Newton)
B	kerapatan fluk magnet	(Tesla)
L	panjang pengantar	(meter)
I	arus	(amper)

1. Kutub magnet utara dan kutub selatan terbentuk garis medan magnet dari kutub utara ke kutub selatan secara merata **gambar-28a**.



Gambar 2.27 : Prinsip dasar motor DC

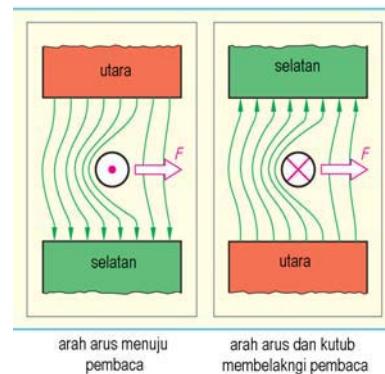
2. Sebatang pengantar yang diberikan arus listrik DC mengalir meninggalkan kita (tanda panah) prinsip elektromagnetik disekitar pengantar timbul medan magnet arah kekalan **gambar-28b**.

3. Timbul interaksi antara medan magnet dari kutub dan medan elektromagnetik dari penghantar, saling tolak menolak timbul gaya F dengan arah kekiri **gambar-2.28c**.
4. Keempat jika arus menuju kita (tanda titik), kawat penghantar mendapatkan gaya F kearah kanan **gambar-2.29a**.
5. Kelima, jika kutub utara-selatan dibalikkan posisi menjadi selatan – utara arah medan magnet berbalik, ketika kawat dialiri arus meninggalkan kita (tanda panah), interaksi medan magnet kawat mendapatkan gaya F kearah kanan **gambar-2.29b**.

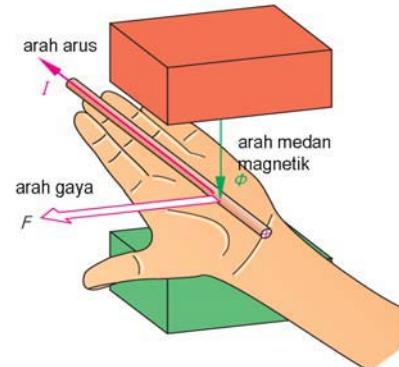
Hukum *tangan kiri Fleming* merupakan prinsip dasar kerja motor DC. Telapak tangan kiri berada diantara kutub utara dan selatan, medan magnet Φ memotong penghantar **gambar-2.30**. Arus I mengalir pada kawat searah keempat jari. Kawat akan mendapatkan gaya F yang arahnya searah ibu jari.

Bagaimana kalau kutub utara-selatan dibalik posisinya ?, sementara arus I mengalir searan keempat jari. Tentukan arah gaya F yang dihasilkan ? Untuk menjawab ini peragakan dengan telapak tangan kiri anda sendiri !!.

Apa yang terjadi bila kutub magnet ditambahkan menjadi dua pasang **gambar-2.31** (kutub utara dan selatan dua buah). Medan magnet yang dihasilkan dua pasang kutub sebesar **$2B$** . Arus yang mengalir ke kawat sebesar I . Maka gaya yang dihasilkan sebesar **$2F$** . Ingat persamaan $F = B.L.I$, jika besar medan magnet **$2B$** dan arus tetap I , maka gaya yang dihasilkan sebesar **$2F$** .



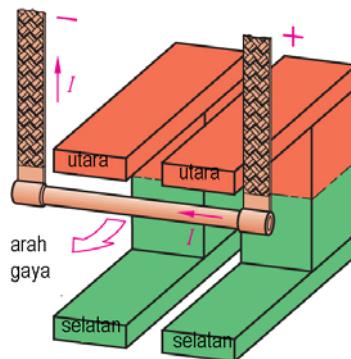
Gambar 2.29 : Torsi F motor DC



Gambar 2.30 : Prinsip tangan kiri Fleming

Contoh:

Kumparan kawat dengan 50 belitan, dialirkan arus sebesar 2 Amper, kumparan kawat ditempatkan diantara kutub utara dan selatan. Gaya F yang terukur 0,75 Newton. Hitung besarnya kerapatan fluk magnet, jika lebar permukaan kutub 60mm dan kebocoran fluksi diabaikan.



Gambar 2.31 : Model uji gaya tolak

Jawaban :

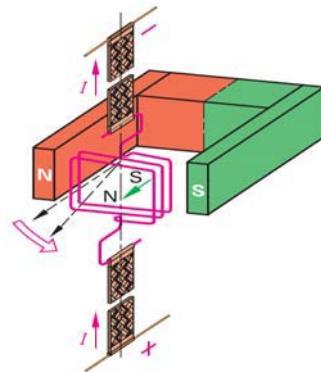
Panjang efektif penghantar $\Rightarrow L = 50 \cdot 60 \cdot 10^{-3} = 3\text{m}$

$$\text{Gaya } F = B \cdot L \cdot I \text{ Newton} \Rightarrow B = \frac{F}{I \cdot L} = \frac{0,75\text{N}}{2\text{A} \cdot 3\text{m}} = 0,125 \text{ Tesla}$$

2.7.2. Prinsip Dasar Kerja Alat Ukur Listrik

Alat ukur listrik dengan penunjuk jarum bekerja berdasarkan prinsip hukum tangan kiri *Flemming*. Sebuah kumparan dari belitan kawat penghantar digantungkan pada dua utas kabel fleksibel, dimana kumparan bisa berputar bebas **gambar-2.32**.

Kumparan kawat ditempatkan diantara kutub magnet utara-selatan berbentuk huruf **U**. Kutub magnet permanen menghasilkan garis medan magnet yang akan memotong kumparan kawat. Ketika kawat dihubungkan sumber listrik dari terminal positif mengalirkan arus listrik I ke terminal negatif.



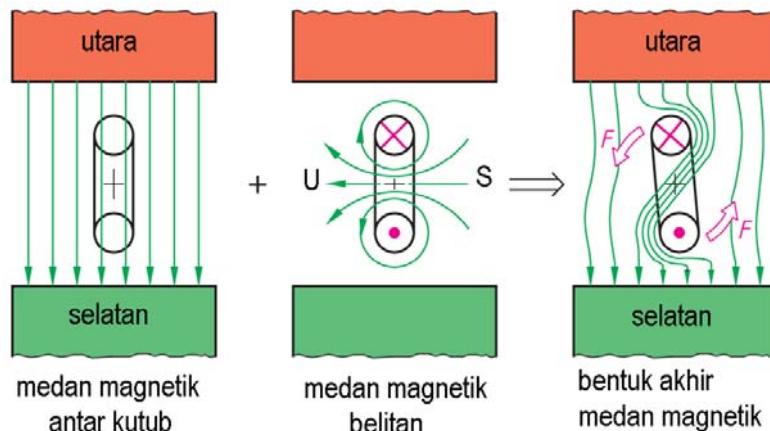
Gambar 2.32: Prinsip alat ukur listrik

Prinsip elektromagnetis dalam kumparan terjadi medan magnet elektromagnetis. Medan magnet kutub permanen berinteraksi saling tolak menolak dengan medan elektromagnetis kumparan, kumparan mendapat gaya putar F akibatnya kumparan berputar searah panah.

Besarnya gaya $F = B \cdot I \cdot L$ Newton

Penjelasan terjadinya kumparan putar mendapatkan gaya F , kutub magnet permanen utara-selatan menghasilkan garis medan magnet B dengan arah dari kutub utara menuju kutub selatan **gambar-2.33a**.

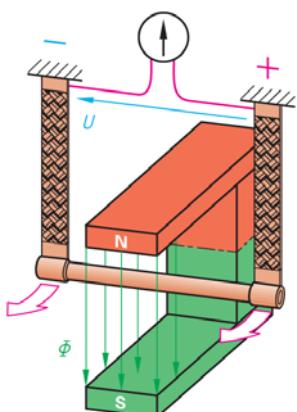
Kumparan kawat dalam posisi searah garis medan magnet berada diantara kutub magnet permanen, dialirkan arus listrik sebesar I . Prinsip elektromagnetik disekitar kumparan putar akan timbul medan magnet sesuai prinsip tangan kanan, kutub utara dikiri kutub selatan dikanan **gambar-2.33b**.



Gambar 2.33 : Prinsip torsi pada kawat berarus

Antara medan magnet permanen dan medan elektromagnetik kumparan putar terjadi saling tolak menolak yang menimbulkan gaya putar sebesar F yang arahnya kekiri **gambar-2.33c**. Besarnya gaya F tergantung tiga komponen, yaitu besarnya kerapatan fluk magnet permanen, besar arus mengalir ke kumparan putar dan panjang kawat kumparan putar.

2.7.3. Prinsip Dasar Kerja Generator



Gambar 2.34 : Prinsip generator

Prinsip kerja generator dikenalkan *Michael Faraday* 1832, sebuah kawat penghantar digantung dua ujungnya ditempatkan diantara kutub magnet permanen utara-selatan **gambar-2.34**. Antara kutub utara dan selatan terjadi garis medan magnet Φ .

Kawat penghantar digerakkan dengan arah panah, maka terjadi di kedua ujung kawat terukur tegangan induksi oleh Voltmeter. Besarnya tegangan induksi tergantung oleh beberapa faktor, diantaranya : *kecepatan menggerakkan kawat penghantar, jumlah penghantar, kerapatan medan magnet permanen B*.

$$U = B \cdot L \cdot v \cdot Z \quad \text{Volt}$$

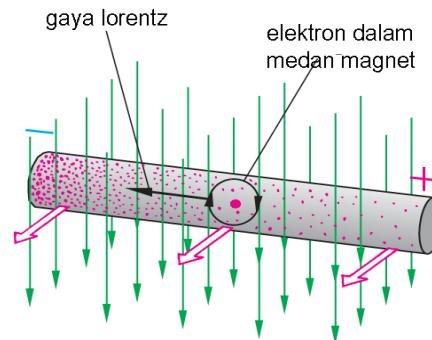
- U Tegangan induksi
- B Kerapatan medan magnet (Tesla)
- L Panjang penghantar (meter)
- v Kecepatan gerakan (m/det)
- z Jumlah penghantar

Terjadinya tegangan induksi dalam kawat penghantar pada prinsip generator terjadi **gambar-2.35**, oleh beberapa komponen. Pertama adanya garis medan magnet yang memotong kawat penghantar sebesar B . Kedua ketika kawat penghantar digerakkan dengan kecepatan v pada penghantar terjadi aliran elektron yang bergerak dan menimbulkan gaya gerak listrik (U). Ketiga panjang kawat penghantar L juga menentukan besarnya tegangan induksi karena makin banyak elektron yang terpotong oleh garis medan magnet.

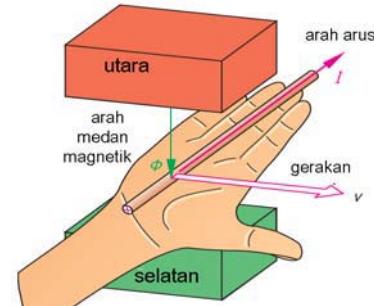
Prinsip tangan kanan Flemming menjelaskan terjadinya tegangan pada generator listrik. Sepasang magnet permanen menghasilkan garis medan magnet Φ **gambar-2.36**, memotong sepanjang kawat penghantar menembus telapak tangan.

Kawat penghantar digerakkan kearah ibu jari dengan kecepatan v . Maka pada kawat penghantar timbul arus listrik I yang mengalir searah dengan arah keempat jari. Apa yang akan terjadi bila posisi magnet permanen utara-selatan dibalikkan, kemana arah arus yang dibangkitkan ?. Untuk menjawabnya peragakan dengan tangan kanan anda dan jelaskan dengan jelas dan sistematis.

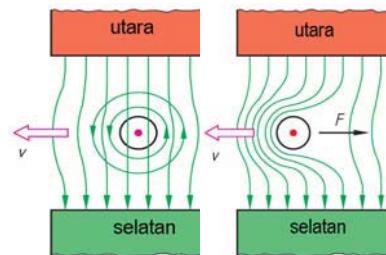
Hukum Lenz, menyatakan *penghantar yang dialiri arus maka sekitar penghantar akan timbul medan elektromagnet*. Ketika kawat penghantar digerakkan kecepatan v dan penghantar melewatkannya arus kearah kita (tanda titik) sekitar penghantar timbul elektromagnet kearah kiri **gambar-2.37a**.



Gambar 2.35 : Prinsip hukum Lorentz



Gambar 2.36 : Prinsip tangan kanan Flemming



Gambar 2.37 : Interaksi elektromagnetik

Akibat interaksi medan magnet permanen dengan medan elektromagnet terjadi gaya lawan sebesar F yang arahnya berlawanan dengan arah kecepatan v kawat penghantar **gambar-2.37b**.

Contoh :

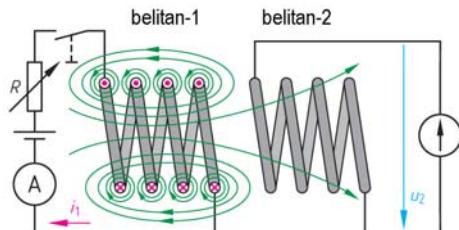
Model generator DC memiliki kerapatan fluk magnet sebesar 0,8 Tesla, panjang efektif dari penghantar 250 mm, digerakkan dengan kecepatan 12m/detik. Hitung besarnya tegangan induksi yang dihasilkan.

Jawaban :

$$U = B \cdot L \cdot v \cdot Z \quad \text{Volt}$$

$$= 0,8 \text{ Tesla} \cdot 250 \cdot 10^{-3} \text{ meter} \cdot 12 \text{ m/det} = 240 \text{ Volt}$$

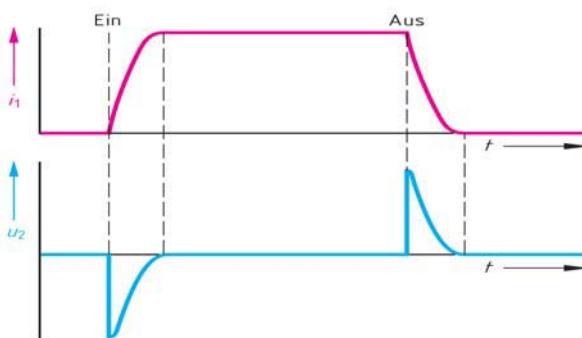
2.7.4. Prinsip Dasar Kerja Transformator



Gambar 2.38: Prinsip induksi elektromagnetik

Dua buah belitan diletakkan berdekatan. Belitan pertama dihubungkan sumber listrik DC, resistor R yang bisa diatur dan saklar yang dapat di ON dan OFF kan. Belitan kedua ujungnya dipasangkan pengukur tegangan Voltmeter **gambar-2.38**.

Ketika saklar di ON kan maka mengalir arus I_1 dan menghasilkan medan magnet dengan arah kutub utara di kanan. Medan magnet dari belitan pertama ini menginduksi ke belitan kedua, sehingga di belitan kedua timbul tegangan induksi U_2 yang terukur oleh Voltmeter kemudian tegangan hilang.



Gambar 2.39 : Gelombang belitan primer dan belitan sekunder

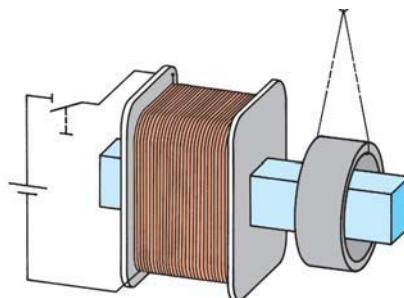
Saklar di OFF kan memutuskan arus listrik I_1 ke belitan pertama, terjadi perubahan dari ada medan magnet menjadi tidak ada. Perubahan medan magnet belitan pertama di induksikan ke belitan kedua, timbul tegangan induksi sesaat di belitan kedua terukur oleh Voltmeter dan kemudian menghilang **gambar-2.39**.

Persamaan tegangan induksi :

$$u_i = - N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

u_i	Tegangan induksi
N	Jumlah lilitan
$\Delta\Phi$	Perubahan fluk magnet
Δt	Perubahan waktu

Metode lain membuktikan adanya tegangan induksi, belitan kawat dipasang pada sebuah inti besi dan dihubungkan sumber listrik DC dengan saklar ON-OFF. Sebuah cincin aluminium diletakkan pada inti besi diujung berdekatan belitan pertama digantungkan dengan benang **gambar-2.40**.



Gambar 2.40 : Induksi pada cincin

Saklar di ON kan maka sesaat ada perubahan arus di belitan pertama dan timbul medan magnet, medan magnet diinduksikan lewat inti besi dan dirasakan oleh cincin aluminium. Dalam cincin yang berfungsi sebagai belitan kedua mengalir arus induksi, arus induksi ini berinteraksi dengan medan magnet belitan pertama sehingga timbul gaya dan cincin bergerak.

Ketika saklar di OFF kan timbul medan magnet kembali, dan induksi diterima cincin dan timbul gaya yang menggerakkan cincin aluminium. Dengan saklar di ON dan OFF kan maka cincin akan bergerak kekiri kekiri berayun-ayun pada gantungannya.

Dalam prakteknya saklar yang ON dan OFF diganti dengan sumber listrik AC yang memang selalu berubah setiap saat besaran tegangannya.

Contoh :

Sebuah model transformator memiliki 600 belitan kawat, fluk medan magnet sebesar 0,2mWeber, saklar di ON-OFF kan dalam waktu 3 milidetik. Hitunglah besarnya tegangan induksi.

Jawaban :

$$u_i = - N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = - 60 \cdot \frac{0,2mWb}{3ms} = - \frac{60 \cdot 0,2mWb}{3ms} = - 4 V$$

2.8. Rangkuman

- Magnet memiliki sifat dapat menarik bahan logam, magnet memiliki dua kutub yaitu kutub utara dan kutub selatan.
- Bagian tengah batang magnet merupakan daerah netral yang tidak memiliki garis gaya magnet.
- Magnet secara mikroskopis memiliki jutaan kutub magnet yang teratur satu dengan lainnya dan memiliki sifat memperkuat satu dengan lainnya, sedangkan logam biasa secara mikroskopis posisi magnetnya acak tidak teratur dan saling meniadakan.
- Bumi merupakan magnet alam raksasa, yang dapat dibuktikan dengan penunjukan kompas kearah utara dan selatan kutub bumi.
- Batang magnet memancarkan garis gaya magnet dengan arah kutub utara dan selatan, dapat dibuktikan dengan menaburkan serbuk besi diatas permukaan kertas dan batang magnet.
- Kutub magnet yang sama akan saling tolak menolak, dan kutub magnet yang berlainan akan saling tarik menarik.
- Elektromagnet adalah prinsip pembangkitan magnet dengan menggunakan arus listrik, aplikasinya pada loud speaker, motor listrik, relay kontaktor dsb.
- Sebatang kawat yang dialiri arus listrik DC akan menghasilkan garis medan magnet disekeliling kawat dengan prinsip genggaman tangan kanan.
- Hukum putaran sekrup (Maxwell), ketika sekrup diputar searah jarum jam (arah medan magnet), maka sekrup akan bergerak maju (arah arus listrik DC).
- Belitan kawat yang dialiri arus listrik DC mengikuti hukum tangan kanan, dimana empat jari menyatakan arah arus listrik, dan ujung jempol menyatakan arah kutub utara elektromagnetik.
- Jumlah garis gaya dalam medan magnet disebut fluksi magnetic (Φ), yang diukur dengan satuan Weber (Wb).

- Fluksi magnetic satu weber bila sebatang penghantar dipotongkan pada garis-garis gaya magnet selama satu detik akan menimbulkan gaya gerak listrik (ggl) sebesar satu Volt. Weber = Volt x detik.
- Gaya gerak magnetic (Θ) berbanding lurus dengan jumlah belitan dan besarnya arus yang mengalir dalam belitan. $\Theta = \text{Amper Lilit}$.
- Kuat medan magnet (H) berbanding lurus dengan gaya gerak magnet (Θ) dan berbanding terbalik dengan panjang lintasan (l_m). $H = I.N/l_m$.
- Kerapatan fluk magnet (B), diukur dengan Tesla (T) besarnya fluk persatuan luas penampang. $B = \Phi/A = \text{Wb}/\text{m}^2 = \text{Tesla}$.
- Bahan ferromagnetic bahan inti dalam transformator, bahan stator motor listrik yang memiliki daya hantar magnetic (permeabilitas) yang baik.
- Ada tiga jenis media magnetic, yaitu ferromagnet, paramagnet dan diamagnet.
- Ferromagnet memiliki permeabilitas yang baik, misalnya Alnico dan permalloy dipakai pada inti transformator dan stator motor listrik.
- Paramagnet memiliki permeabilitas kurang baik, contohnya aluminium, platina dan mangan.
- Diamagnet memiliki permeabilitas buruk, contohnya tembaga, seng, perak dan antimony.
- Permeabilitas hampa udara perbaandingan antara kerapatan fluk magnet (B) dengan kuat medan magnet (H) pada kondisi hampa udara.
- Permeabilitas bahan magnet diperbandingkan dengan permeabilitas hampa udara yang disebut permeabilitas relative.
- Kurva Histerisis ($B-H$) menggambarkan sifat bahan magnet terhadap permeabilitas, remanensi dan koersivity. Bahan yang cocok untuk magnet permanen yang memiliki sifat remanensi dan koersivity yang tinggi. Sedangkan bahan yang cocok sebagai inti trafo atau stator motor yang memiliki sifat permeabilitas dan tingkat kejemuhan dari kerapatan fluk magnet yang tinggi.
- Prinsip kerja Motor Listrik berdasarkan kaidah tangan kiri Flemming,
- Hukum tangan kiri Flemming yang menyatakan jika telapak tangan kiri berada diantara kutub magnet utara dan selatan. Sebatang kawat yang dialiri arus listrik I dipotong oleh medan magnet B . Maka kawat akan mengalami torsi F searah dengan ibu jari (gambar 2.30)

- Hukum tangan kiri *Flemming*, besarnya Torsi $F = B \cdot L \cdot I$, dimana B merupakan kerapatan fluk magnet. L menyatakan panjang kawat dan I besarnya arus yang melewati penghantar kawat.
- Prinsip kerja alat ukur juga berdasarkan hukum tangan kiri *Flemming*, dimana kumparan putar dihubungkan dengan jarum penunjuk skala meter.
- Prinsip kerja generator berdasarkan hukum tangan kanan *Flemming*.
- Hukum tangan kanan Fleming menjelaskan prinsip pembangkitan tegangan, jika telapak tangan kanan berada pada kutub magnet utara selatan, sebatang kawat digerakkan searah ibu jari F , maka pada batang kawat akan timbul arus listrik yang searah dengan keempat telunjuk tangan kanan.
- Prinsip kerja transformator berdasarkan prinsip induksi dua belitan kawat primer dan sekunder. Jika pada belitan primer terdapat gaya magnet yang berubah-ubah, maka pada belitan sekunder terjadi induksi gaya gerak listrik.
- Besarnya tegangan induksi berbanding lurus dengan jumlah belitan kawat dan berbanding dengan perubahan medan magnet persatuan waktu ($\Delta\emptyset/\Delta t$).

2.9. Prinsip Dasar Kerja Transformator

1. Jelaskan mengapa magnet memiliki sifat menarik besi, sedangkan logam non besi seperti aluminium dan tembaga tidak dipengaruhi magnet.
2. Magnet memiliki sifat tarik menarik dan tolak-menolak, kapan kedua sifat tersebut terjadi. Peragakan dengan menggunakan model kutub utara dan kutub selatan.
3. Besi biasa dapat dijadikan magnet dengan menggunakan prinsip elektro magnetic, jelaskan bagaimana membuat elektromagnetik dengan sumber tegangan DC dari akumulator 12 Volt.
4. Gambarkan rangkaian Bel Listrik dengan sumber listrik DC 12 Volt, dan terangkan cara kerjanya.
5. Bagaimana cara menentukan kutub utara dan selatan magnet permanen dengan bantuan sebuah kompas, jelaskan dengan gambar.
6. Belitan kawat yang dialiri arus listrik DC akan menghasilkan garis gaya magnet. Peragakan dengan menggunakan tangan kanan, tentukan

arah belitan kawat, arah aliran arus DC dan tentukan garis gaya magnet yang dihasilkan.

7. Peragakan didepan kelas prinsip tangan kanan Flemming, untuk menunjukkan prinsip kerja generator. Tunjukkan arah gerakan kawat, arah medan magnet yang memotong kawat dan tunjukkan arah gaya gerak listrik yang dihasilkan.
8. Peragakan didepan kelas dengan prinsip tangan kiri Flemming untuk menunjukkan cara kerja Motor Listrik. Tunjukkan arah garis medan magnet, arah aliran arus listrik DC dan arah torsi putar yang dihasilkan.
9. Belitan kawat sebanyak 1000 lilit, dialiri arus 4 A. Hitunglah a) gaya gerak magnetiknya b) jika kasus a) dipakai 2000 lilit berapa besarnya arus ?
10. Kumparan toroida dengan 1000 belitan kawat, panjang lintasan magnet 30cm, arus yang mengalir sebesar 200mA. Hitung besarnya kuat medan magnetiknya
11. Belitan kawat bentuk inti persegi 40mm x 25mm, menghasilkan kuat medan magnet sebesar 1,0 Tesla. Hitung besar fluk magnetnya.
12. Belitan kawat rongga udara memiliki kerapatan 1.000 A/m, Hitung besar fluk magnetnya, bila diketahui $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Wb/Am.
13. Besi toroid mempunyai keliling 0,4 meter dan luas penampang 1 cm^2 . Toroida dililitkan kawat 800 belitan dialiri arus sebesar 100mA. Agar diperoleh fluk magnet sebesar $80\mu\text{Wb}$ pada toroida tsb. Hitung a) kuat medan magnet b) kerapatan fluk magnet c) permeabilitas absolut dan d) permeabilitas relatif besi.
14. Berdasarkan luas penampang inti 80 cm^2 dan fluk magnetnya 10 mWb . Panjang lintasan inti besi 150 cm, jarak celah udara 5 mm. Hitung a) kerapatan fluk magnet pada inti besi dan tentukan besarnya gaya gerak magnet. b) Hitung besarnya gaya gerak magnet total

BAB 3

DASAR LISTRIK ARUS BOLAK BALIK

Daftar isi :

3.1	Prinsip Pembangkitan Listrik AC	3-2
3.2	Prinsip Dasar Listrik AC	3-4
3.3	Komponen Pasif Dalam Listrik AC	3-12
3.4	Bilangan Komplek.....	3-17
3.5	Rangkaian Resistor Seri Induktor dengan Listrik AC	3-21
3.6	Rangkaian Resistor Seri dengan Kapasitor	3-33
3.7	Resonansi.....	3-40
3.8	Sistem Listrik Tiga Fasa.....	3-45
3.9	Pengukuran Daya Listrik Tiga Phasa.....	3-53
3.10	Kompensasi Daya.....	3-55
3.11	Rangkuman	3-58
3.12	Soal-soal.....	3-61

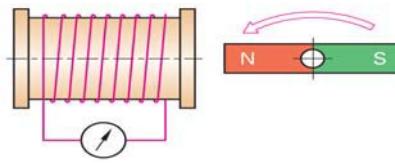
3.1. Prinsip Pembangkitan Listrik AC

Listrik AC dihasilkan dari hasil induksi elektromagnetik **gambar-3.1**, sebuah belitan kawat yang berdekatan dengan kutub magnet permanen. Kutub permanen diputar pada sumbunya, maka diujung-ujung belitan timbul tegangan listrik yang ditunjukkan oleh penunjukan jarum Voltmeter. Jarum Voltmeter bergoyang kearah kanan dan kekiri, ini menunjukkan satu waktu polaritasnya positif, satu waktu polaritasnya negatif.

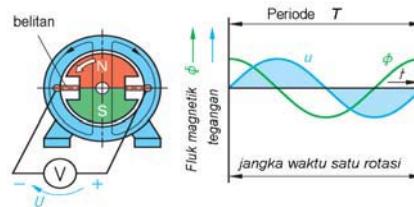
Generator AC sederhana **gambar-3.2**, terdiri stator dengan belitan kawat dan rotor dengan dua kutub. Saat rotor diputar satu putaran dan ujung belitan diukur dengan voltmeter dihasilkan tegangan AC satu periode. Bentuk tegangan sinusoida dan fluk magnet berbeda phasa 90° .

Berikut ini konstruksi sederhana generator AC dengan rotor empat kutub **gambar-3.3**. Saat rotor diputar satu putaran, ujung belitan diukur tegangan dengan Voltmeter. Setiap satu putaran rotor dihasilkan dua siklus tegangan sinusoida. Jika frekuensi diinginkan 50 Hz, maka rotor dalam satu detik harus berputar 25 putaran/detik, atau kalau satu menit 60 detik, maka rotor harus berputar sebanyak 1500 putaran/menit.

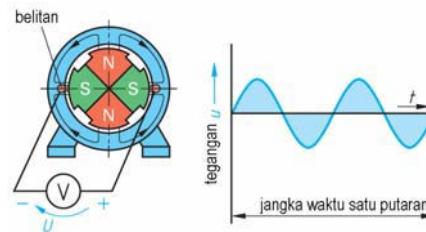
Kutub permanen utara dan kutub selatan menghasilkan garis fluk magnet **gambar-3.4**. Belitan kawat dengan poros yang ujung-ujungnya disambungkan dengan dua cincin putar. Ketika poros diputar, belitan kawat akan memotong garis fluk magnet, sesuai dengan hukum tangan kiri Flemming maka pada ujung2 cincin akan timbul tegangan yang terukur oleh Voltmeter. Bentuk tegangan berupa gelombang sinus.



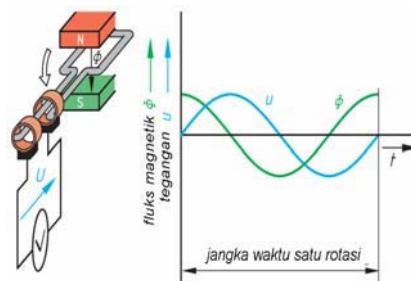
Gambar 3.1 : Prinsip pembangkitan Listrik AC



Gambar 3.2 : Generator AC dua kutub

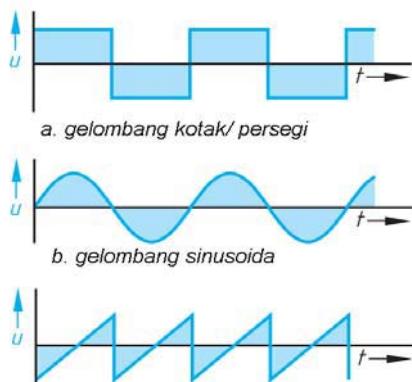


Gambar 3.3 : Generator AC empat kutub



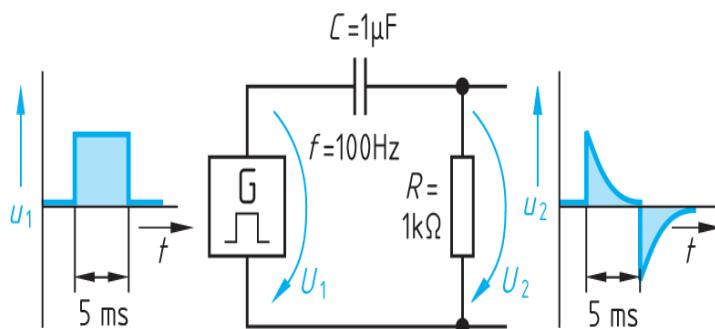
Gambar 3.4 : Prinsip generator AC

Bentuk gelombang AC secara umum **gambar-3.5**, berwujud bentuk sinusoida, gelombang persegi dan bentuk zig-zag. Satu periode gelombang adalah satu siklus penuh, yaitu satu siklus positif dan satu siklus negatif. Gelombang listrik komersial PLN yang dipakai untuk rumah tangga dan industri adalah sinusoida frekuensi 50 Hz.



Gambar 3.5 : Bentuk gelombang AC

Untuk menghasilkan bentuk gelombang listrik untuk kebutuhan khusus seperti bentuk pulsa, dihasilkan dengan rangkaian Resistor dan Kapasitor **gambar-3.6**. Sumber tegangan kotak dengan frekuensi 100 Hz (5 milidetik) jika dirangkaikan dengan Kapasitor $C = 1\mu F$ dan Resistor $R = 1\text{ k}\Omega$, akan dihasilkan bentuk gelombang output seperti gigi gergaji dengan ujung tajam dan kemudian turun drastis.



Gambar 3.6 : Rangkaian pembangkit gelombang pulsa

- Prinsip generator sederhana sebuah koil, bila didekatnya digerak-gerakan magnet permanen, pada ujung koil terukur arus bolak-balik
- Prinsip generator AC sesuai kaidah tangan kiri *Flemming*, belitan kawat dalam loop tertutup yang dipotong oleh garis gaya magnet, pada ujung belitan kawat akan timbul ggl induksi.
- Bentuk gelombang AC bisa berupa gelombang sinusoida, gelombang kotak, gelombang pulsa dsb.

3.2. Prinsip Dasar Listrik AC

Arus listrik bolak balik (*Alternating Current, AC*) dihasilkan oleh pembangkit listrik AC, yaitu generator AC. Sumber tegangan AC **gambar-3.7a** dihubungkan dengan Voltmeter dan Osiskop untuk melihat bentuk gelombang AC.

Listrik AC satu phasa memiliki bentuk gelombang sinusoida **gambar-3.7b** dalam satu siklus periode memiliki nilai positif dan nilai negatif. Nilai maksimum di hitung dari puncak ke puncak.

Persamaan frekuensi listrik AC:

$$f = \frac{1}{T} \quad T = \frac{1}{f} \quad [f] = \frac{1}{s} = 1 \text{ Hz}$$

f : frekuensi (Hz)

T : periode (detik)

1 Hertz = 1 Periode per detik

1 Kilohertz = 1 kHz = 1.000 Hz = 10^3 Hz

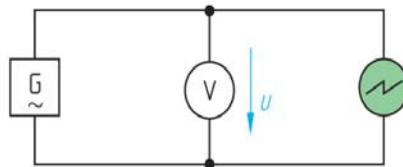
1 Megahertz = 1 MHz = 1.000.000 Hz = 10^6 Hz

Contoh: Frekuensi PLN diketahui $f = 50$ Hz, hitung besarnya periode ?

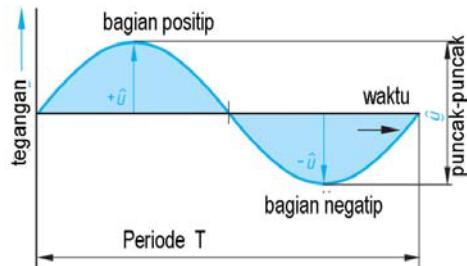
Jawaban :

$$f = \frac{1}{T}; \Rightarrow T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50 \text{ Hz}} = \frac{1}{50 \cdot \frac{1}{s}} = 0,02 \text{ s} = \mathbf{2 \text{ mili detik}}$$

- Listrik AC dihasilkan oleh sumber tegangan AC berupa generator AC atau generator fungsi (function generator).
- Pada frekuensi 50 Hz, dalam satu detik terjadi perubahan siklus positif negatif sebanyak 50 kali, dalam satu menit rotor akan berputar 3000 Rpm



a. Rangkaian percobaan gelombang AC

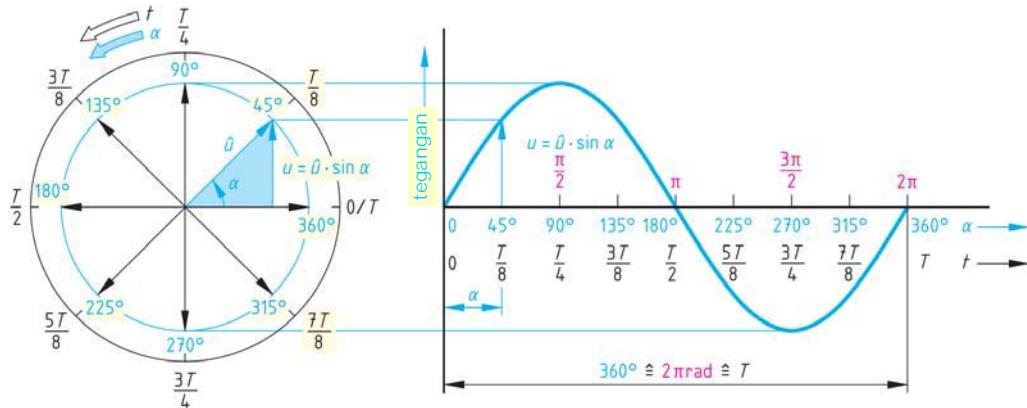


b. Gelombang sinusoida

Gambar 3.7 : Satu siklus

3.2.1. Prinsip Gelombang Sinusoida.

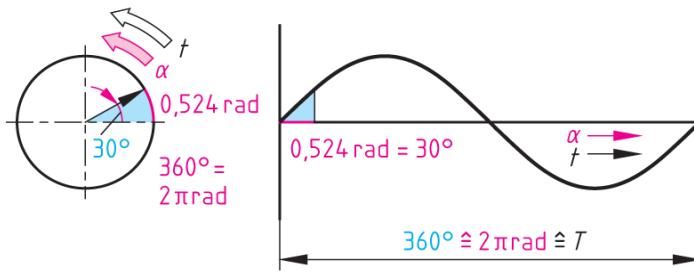
Menjelaskan terbentuknya gelombang sinusoida **gambar-3.8a**, dari sebuah lingkaran dibagi menjadi 8 bagian dengan sudut 45° ($360^\circ/8$). Satu putaran lingkaran disebut satu periode T . Mulai dari sudut 0° ($0/T$); 45° ($T/8$); 90° ($T/4$); 135° ($3T/8$); 180° ($T/2$); 225° ($5T/8$); 270° ($3T/4$); 315° ($7T/8$) dan 360° ($8T/8$).



Gambar 3.8a : Pembentukan gelombang sinusoida.

Dari kuadran garis tegak dan garis lurus, dibagi juga menjadi delapan bagian sama dengan membagi lingkaran, yaitu : 0° ($0/T$); 45° ($T/8$); 90° ($T/4$); 135° ($3T/8$); 180° ($T/2$); 225° ($5T/8$); 270° ($3T/4$); 315° ($7T/8$) dan 360° ($8T/8$).

Berikutnya memproyeksikan antara titik-titik sudut pada lingkaran dengan titik-titik di garis kuadrant, misalnya titik sudut 45° dengan 45° , titik sudut 180° dengan 180° ; titik sudut 170° dengan titik sudut 175° dan seterusnya sampai sudut terakhir. Tarik garis lengkung dari sudut 0° ; 45° ; 90° ; 135° ; 180° ; 225° ; 270° ; 315° dan 360° , hasilnya sebuah bentuk grafik sinusoida.



Gambar 3.8b : Proyeksi lingkaran ke garis kuadran.

$$\frac{\alpha_B}{2\pi rad} = \frac{\alpha_G}{360^\circ} \Rightarrow \alpha_B = \frac{\alpha_G}{360^\circ} \cdot 2\pi rad \quad \alpha_G = \frac{\alpha_B}{2\pi rad} \cdot 360^\circ$$

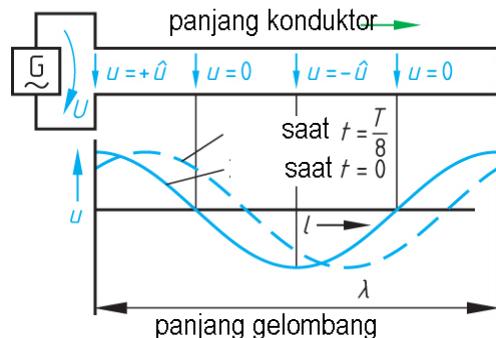
$$\omega = \frac{\alpha_B}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f$$

- α_B (rad)
- α_G (gradien)
- ω kecepatan sudut (rad)
- t waktu (detik)
- T periode
- f frekuensi

- Satu siklus/ periode terjadi dalam 360° atau 2π radian.
- Polaritas pada setiap setengah periode akan berbalik.
- Harga maksimum terjadi pada 90° dan 270° .
- Harga nol terjadi pada 0° dan 180° .

3.2.2. Frekuensi dan Panjang Gelombang

Frekuensi adalah jumlah periode dalam satu detik. PLN memiliki frekuensi 50 Hz, artinya dalam satu detik memiliki 50 periode. Frekuensi memiliki panjang gelombang **gambar-3.9** dengan satuan (meter). Panjang gelombang dihitung berdasarkan konstanta kecepatan cahaya : 300.000 km/detik.



Gambar 3.9 Panjang gelombang

Persamaan panjang gelombang:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\lambda] = \frac{\frac{m}{s}}{\frac{1}{s}} = m$$

λ : panjang gelombang (m)

c : konstanta kecepatan cahaya,
300.000 km/detik

f : frekuensi (Hz)

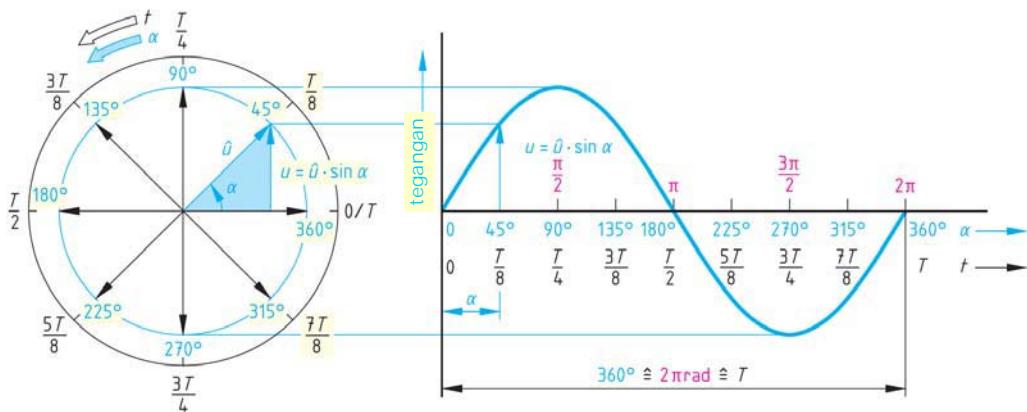
Contoh : Frekuensi radio *FM 100 Mhz* panjang gelombangnya sebesar :

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300 \cdot 10^6}{100 \cdot 10^6} = 3 \text{ meter}$$

- *Frekuensi* adalah jumlah periode dalam satu detik. PLN memiliki frekuensi 50 Hz, gelombang radio frekuensi orde Mega Hertz
- *Panjang gelombang*, dihitung berdasarkan kecepatan cahaya, 300.000 km/detik.

3.2.3. Harga Sesaat

Gelombang sinusoida **gambar-3.10** dibuat dalam bentuk diagram lingkaran dan gelombang sinusoida. Diagram lingkaran terbagi menjadi delapan bagian yang setiap segmen besarnya 45° ($360^\circ/8$), yaitu dititik $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ, 360^\circ$.



Gambar 3.10 Harga sesaat gelombang sinusoida

Dengan memutar lingkaran berlawanan jarum jam maka dapat dibuat gelombang sinusoida yang memiliki dua sumbu, sumbu tegak dan sumbu mendatar. Sumbu mendatar terbagi menjadi delapan titik, yaitu : 0° ($0/T$); 45° ($T/8$); 90° ($T/4$); 135° ($3T/8$); 180° ($T/2$); 225° ($5T/8$); 270° ($3T/4$); 315° ($7T/8$) dan 360° ($8T/8$).

Tabel 3.1 Harga Sesaat Tegangan Sinusoida

Derajat	Sin α	Tegangan
0°	0	0
45°	0,707	0,707
90°	1,00	1,00
135°	0,707	0,707
180°	0	0
225°	-0,707	-0,707
270°	-1,00	-1,00
315°	-0,707	-0,707
360°	0	0

Harga sesaat dari gelombang sinusoida untuk suatu sudut putaran dinyatakan :

$$u = \hat{u} \cdot \sin \alpha = \hat{u} \cdot \sin(\omega t)$$

$$i = \hat{i} \cdot \sin \alpha = \hat{i} \cdot \sin(\omega t)$$

- u, i harga sesaat tegangan, arus
- \hat{u}, \hat{i} harga maksimum tegangan, arus
- ω kecepatan sudut (radian)
- α besarnya sudut

Contoh: Gelombang sinusoida bervariasi dari 0 hingga 100 Volt (maksimum). Hitung besarnya tegangan sesaat pada sudut $30^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 270^\circ$ dari satu periode ?

Jawaban : $u = U_m \cdot \sin(\omega t) = U_m \sin \alpha = 100 \sin \alpha$

$$\text{Pada sudut } 30^\circ = 100 \sin 30^\circ = 100 \cdot 0,5 = 50 \text{ Volt}$$

$$45^\circ = 100 \sin 45^\circ = 100 \cdot 0,707 = 70,7 \text{ Volt}$$

$$90^\circ = 100 \sin 90^\circ = 100 \cdot 1,0 = 100 \text{ Volt}$$

$$270^\circ = 100 \sin 270^\circ = 100 \cdot -1,0 = -100 \text{ Volt}$$

- Satu siklus/periode terjadi dari 0° sampai 360° atau 2π radian
- Polaritas pada setiap setengah periode akan berbalik, dari positif menuju ke negatif.
- Harga maksimum terjadi pada 90° dan 270°
- Harga nol terjadi pada 0° dan 180°

3.2.4. Harga Rata-rata

Harga rata-rata dari tegangan atau arus bolak balik diperoleh dengan menghitung rata-rata harga sesaat, didapat dengan menghitung dari setengah periode saja.

Tabel 3.2 Harga rata-rata gelombang sinusoida

Interval	Sudut α	$\sin \alpha$
1	15°	0,26
2	30°	0,50
3	45°	0,71
4	60°	0,87
5	75°	0,97
6	90°	1,00
7	105°	0,97
8	120°	0,87
9	135°	0,71
10	150°	0,50
11	165°	0,26
12	180°	0,00
Jumlah		7,62
Harga rata-rata = $7,62/12 = 0,636$		

Persamaan harga rata-rata :

$$U_{\text{rata-rata}} = Um \cdot 0,636$$

$$i_{\text{rata-rata}} = Im \cdot 0,636$$

Contoh: Tegangan bolak balik memiliki tegangan maksimum 100 Volt. Hitung besarnya tegangan rata-rata dalam satu periode ?

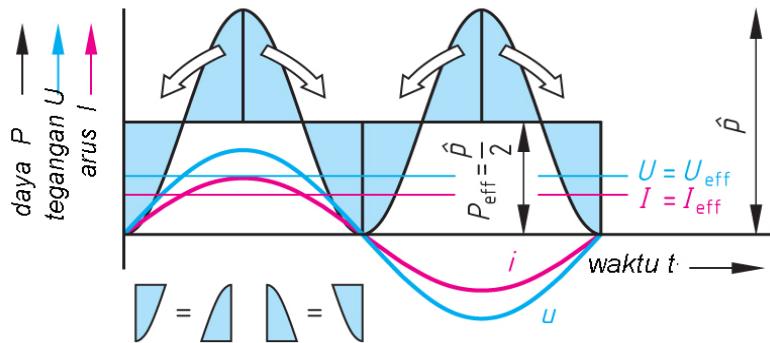
Jawaban :

$$U_{\text{rata-rata}} = Um \cdot 0,636 = 100 V \times 0,636 = 63,6 \text{ Volt}$$

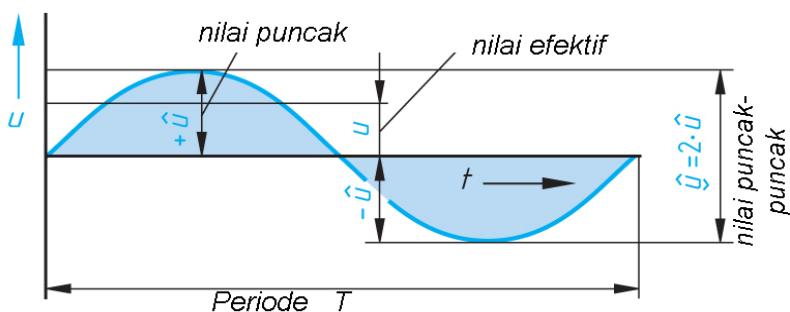
Harga rata-rata gelombang sinusoida, yaitu 0,636 harga maksimum

3.2.5. Harga Efektif

Harga efektif **gambar-3.11** dari suatu tegangan/ arus bolak balik (AC) adalah sama dengan besarnya tegangan/arus searah (DC) pada suatu tahanan, dimana keduanya menghasilkan panas yang sama. Tegangan PLN 220 V merupakan tegangan efektif, bukan harga tegangan sesaat dan bukan pula harga tegangan maksimum.



Gambar 3.11 : Prinsip harga efektif gelombang sinusoida



Gambar 3.12 :Nilai puncak, nilai efektif gelombang sinusoida.

$$P_{\text{eff}} = 0,5 \cdot \hat{p}$$

$$I_{\text{eff}}^2 \cdot R = 0,5 \cdot I_m^2 \cdot R$$

$$P_{\text{eff}} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$$

$$I_{\text{eff}}^2 = 0,5 \cdot I_m^2$$

$$P_{\text{eff}} = I_{\text{eff}}^2 \cdot R$$

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{0,5 \cdot \hat{i}^2} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \hat{i}^2} = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}}$$

$$\hat{p} = \hat{i}^2 \cdot R$$

Tabel 3.3 Harga efektif gelombang sinusoida

Interval	Sudut α	$\sin \alpha$	$\sin^2 \alpha$
1	15°	0,26	0,07
2	30°	0,50	0,25
3	45°	0,71	0,50
4	60°	0,87	0,75
5	75°	0,97	0,93
6	90°	1,00	1,00
7	105°	0,97	0,93
8	120°	0,87	0,75
9	135°	0,71	0,50

10	150°	0,50	0,25
11	165°	0,26	0,07
12	180°	0,00	0,00
Jumlah			6,00
$\text{Harga efektif} = \sqrt{\frac{6}{12}} = 0,707$			

Untuk menghitung tegangan dan arus efektif pada gelombang sinusoida **gambar-3.12** diperoleh.

$$U = U_{\text{eff}} = \frac{Um}{\sqrt{2}} = 0,707.Um$$

$$I = I_{\text{eff}} = \frac{Im}{\sqrt{2}} = 0,707.Im$$

$U = U_{\text{eff}}$ Tegangan efektif (V)

$I = I_{\text{eff}}$ Arus efektif (A)

Im Arus maksimum (A)

Um Tegangan maksimum (V)

Contoh : Tegangan bolak balik sebesar 24 V berbentuk gelombang sinusoida, hitung besarnya tegangan maksimum, tegangan maksimum ke maksimum.

Jawaban :

a) $Um = \sqrt{2}.U = \sqrt{2}.24V = 34 \text{ Volt}$

b) $Um - m = 2.Um = 2.34V = 68 \text{ Volt}$

- Harga efektif suatu tegangan/arus bolak balik adalah sama besarnya dengan tegangan/arus DC pada suatu tahanan, akan menghasilkan panas yang sama.
- Harga efektif gelombang sinusoida besarnya 0,707 dari harga maksimum tegangan/arus

3.2.6. Tabel Rumus-rumus Tegangan Efektif.

Dalam tabel-3 dibuat tabel dari sepuluh jenis gelombang tegangan, untuk menghitung tegangan efektif.

Tabel 3.4 Bentuk tegangan dan arus listrik AC.

Tegangan	Efektif	Rata-rata	Faktor	Tegangan	Efektif		Faktor
sinusoida	$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$	$\bar{u} = 0$	$F_c = \sqrt{2}$	gigi gergaji	$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{3}}$	$\bar{u} = 0$	$F_c = \sqrt{3}$
persegi	$U = \hat{u}$	$\bar{u} = 0$	$F_c = 1$	impuls segitiga	$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{3}}$	$\bar{u} = \frac{\hat{u}}{2}$	$F_c = \sqrt{3}$
pulsa persegi (1)	$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$	$\bar{u} = \frac{\hat{u}}{2}$	$F_c = \sqrt{2}$	impuls gigi gergaji	$U = \sqrt{\frac{t_i}{3 \cdot T}} \cdot \hat{u}$	$\bar{u} = \frac{t_i \cdot \hat{u}}{2 \cdot T}$	$F_c = \sqrt{\frac{3 \cdot T}{t_i}}$
pulsa persegi (2)	$U = \sqrt{\frac{t_i}{T}} \cdot \hat{u}$	$\bar{u} = \frac{t_i \cdot \hat{u}}{T}$	$F_c = \sqrt{\frac{T}{t_i}}$	penyeraah 1/2 gelombang	$U = \frac{\hat{u}}{2}$	$\bar{u} = \frac{\hat{u}}{\pi}$	$F_c = 2$
segitiga	$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{3}}$	$\bar{u} = 0$	$F_c = \sqrt{3}$	penyeraha gel. penuh	$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$	$\bar{u} = \frac{2 \cdot \hat{u}}{\pi}$	$F_c = \sqrt{2}$

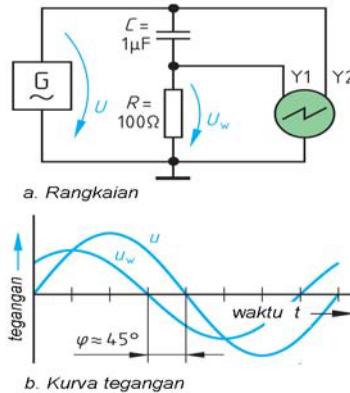
u nilai rata-rata, U teg efektif, t waktu T periode

3.3. Komponen Pasif Dalam Listrik AC

3.3.1. Resistor Dalam Tegangan AC

Untuk menjelaskan pergeseran phasa **gambar-3.13a** sebuah sumber tegangan bolak-balik G dirangkai dengan sebuah Kapasitor $C = 1 \mu F$ dan Resistor $R = 100 \Omega$. Dengan **osiloskop** dua kanal probe Y1 dan probe Y2 disambungkan untuk melihat bentuk gelombang pergeseran phasa. Sumber tegangan bolak-balik diset sebesar U, diujung tahanan R akan terukur drop tegangan sebesar U_w .

Osiloskop dua kanal dengan probe Y1 untuk mengukur drop tegangan tahanan R sebesar U_w dan probe Y2 untuk tegangan U **gambar-3.13b**.



Gambar 3.13 : Rangkaian resistor listrik AC

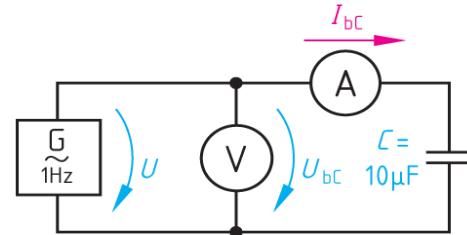
Ternyata tegangan di rangkaian sebesar U dan drop tegangan ditahanan R sebesar U_w bergeser sudut phasanya sebesar $\phi = 45^\circ$. Kapasitor C menyebabkan pergeseran phasa sebesar ϕ dengan tegangan U_w mendahului (*leading*) terhadap tegangan U . Jika Kapasitor C diganti dengan induktor L , yang terjadi adalah pergeseran phasa dimana drop tegangan di induktor terbelakang (*lagging*) sebesar ϕ .

- Pergeseran phasa terjadi ketika tahanan R dirangkai seri dengan kapasitor dan dipasang pada sumber tegangan bolak balik
- Kapasitor menyebabkan pergeseran phasa dimana tegangan drop di kapasitor mendahului (*leading*) terhadap tegangan sumbernya.
- Induktor menyebabkan pergeseran phasa arus tertinggal (*lagging*) terhadap tegangan sumbernya.

3.3.2. Kapasitor dalam Rangkian Listrik AC

Kapasitor memiliki sifat melewatkannya arus bolak balik. *Function generator* diset frekuensi 1 Hz dihubungkan dengan *Voltmeter*, *Ampermeter* dan sebuah Kapasitor $10 \mu F$. Tegangan sumber U dan tegangan di ujung Kapasitor U_{bc} akan dilalui arus sebesar I_{bc} **gambar-3.14**.

Besarnya reaktansi kapasitif X_C :



Gambar 3.14 : Kapasitor pada sumber listrik AC

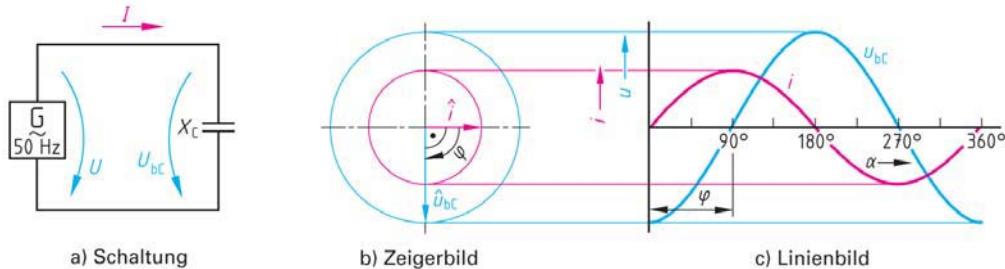
$$X_C = \frac{U_{bc}}{I} = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (\Omega)$$

$$[C] = \frac{As}{V} = F \quad [X_C] = \frac{1}{\frac{1}{s} \cdot \frac{As}{V}} = \Omega$$

F	Satuan Kapasitor, (farad)
U_{bc}	Tegangan Kapasitor, (V)
I	Arus, (A)
X_C	Reaktansi kapasitif, (Ω)
ω	Kecepatan sudut. (radian)
C	Kapasitor

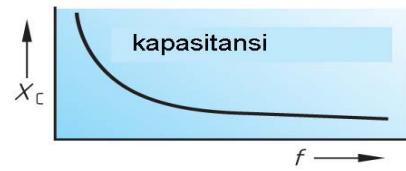
Rangkaian Kapasitor dengan reaktansi X_C diberikan sumber tegangan AC 50 Hz, maka akan mengalir arus sebesar I dan pada ujung Kapasitor akan terukur

drop tegangan sebesar U_{bc} **gambar-3.15a**. Diagram lingkaran dengan jari-jari lingkaran luar drop tegangan U_{bc} , dan jari-jari lingkaran dalam besarnya arus i **gambar-3.15b**. Bentuk gelombang tegangan dan arus beban Kapasitor, tampak bahwa arus i yang melewati Kapasitor mendahului (*leading*) terhadap tegangan U_{bc} sebesar 90° .



Gambar 3.15 :Gelombang tegangan dan arus beban Kapasitor

Nilai reaktansi Kapasitor berbanding terbalik dengan frekuensi ($X_c = 1/2\pi f C$). Artinya pada frekuensi rendah, nilai reaktansi kapasitansi besar. Ketika frekuensi dinaikkan, reaktansi kapasitansi nilainya akan menurun **gambar-3.16**.



Gambar 3.16 : Nilai kapasitansi fungsi frekuensi

Nilai reaktansi Kapasitor berbanding terbalik dengan kapasitansinya ($X_c = 1/2\pi f C$). Semakin besar nilai farad Kapasitor maka reaktansinya makin kecil, sebaliknya makin kecil nilai faradnya makin besar nilai reaktansi kapasitifnya.

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}; X_c = \frac{U_{bc}}{I}$$

$$[X_c] = \frac{V}{A} = \frac{1}{\frac{1}{s} \cdot \Omega} = \Omega$$

Contoh : Kapasitor $1 \mu F$, dihubungkan dengan frekuensi 50 Hz . Hitung nilai reaktansi kapasitifnya.

Jawaban :

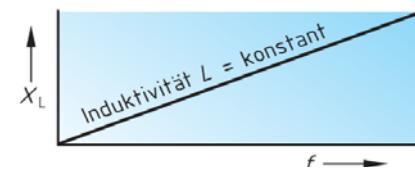
$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot \frac{1}{10^6} \cdot \frac{1}{10^{-6}}} = 3.185 \Omega$$

- Reaktansi kapasitif (X_C) perbanding terbalik dengan frekuensi
- Makin besar frekuensi nilai reaktansi kapasitif menurun, pada frekuensi rendah nilai reaktansi kapasitif meningkat.

3.3.3. Induktor dalam Rangkaian Listrik AC

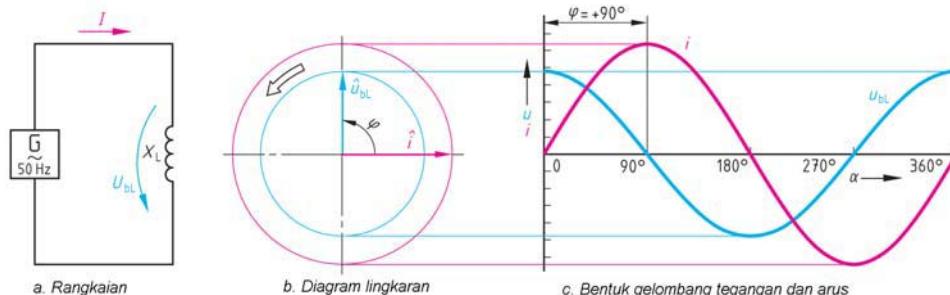
Bila sebuah kumparan yang induktansinya L Henry dihubungkan dengan sumber tegangan AC, maka kumparan tersebut menghasilkan ggl lawan.

Inti induktor dapat dari bahan *ferromagnet*, ferrit. Besaran reaktansi induktor X_L **gambar-3.17**, meningkat berbanding lurus dengan kenaikan frekuensi dan satuan reaktansi induktor Ohm.



Gambar 3.17 : Nilai induktansi fungsi frekuensi

Rangkaian induktor X_L dihubungkan sumber tegangan AC 50 Hz, pada ujung induktor drop tegangan U_{bL} **gambar-3.18a**. Diagram lingkaran memiliki dua lingkaran, lingkaran luar dengan jari-jari arus i , lingkaran dalam dengan jari-jari drop tegangan induktor U_{bL} , antara arus dan tegangan beda phasa $\varphi = 90^\circ$ **gambar-3.18b**. Bentuk gelombang arus i dan drop tegangan induktor U_{bL} , arus i dijadikan referensi dari 0° sampai 360° . drop tegangan U_{bL} mendahului arus i sebesar $\varphi = 90^\circ$ **gambar-3.18c**.



Gambar 3.18 : Bentuk gelombang tegangan dan arus beban Induktor

Persamaan induktor :

$$X_L = \frac{U_{bL}}{I} = \omega \cdot L = 2\pi f \cdot L$$

$$[L] = \frac{Vs}{A} = H \quad [X_L] = \frac{1}{s} \cdot \frac{Vs}{A} = \Omega$$

UbL	Drop tegangan (V)
I	Arus efektif (A)
XL	Reaktansi induktif (Ω)
ω	Kecepatan sudut (radian)
L	Induktor (henry)
f	Frekuensi (Hz)

Contoh : Induktor murni sebesar 10,8 H, dihubungkan dengan sumber tegangan AC $340 \sin 314t$. Tentukan besarnya arus sesaat .

Jawaban :

$$X_L = \frac{U_{bL}}{I} = \omega \cdot L = 2\pi f \cdot L$$

$$U = U_m \sin \omega t = 340 \sin 314t$$

$$\omega = 314 \text{ rad/detik}$$

$$X_L = \frac{U_{bL}}{I} = \omega \cdot L = 314 \cdot 10,8H = \mathbf{3400 \Omega}$$

$$Im = \frac{Um}{X_L} = \frac{340V}{3.400\Omega} = \mathbf{0,1 A}$$

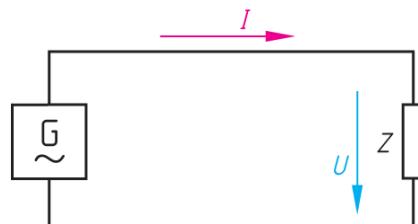
Arus tertinggal sebesar 90° ($\pi/2$ rad), jadi besarnya arus sesaat :

$$i = 0,1 \sin (314t - \pi/2) A$$

- Reaktansi Induktif (X_L) perbanding lurus dengan frekuensi
- Makin besar frekuensi nilai reaktansi induktif meningkat, pada frekuensi rendah nilai reaktansi induktif akan menurun.
- Drop tegangan induktor mendahului 90° terhadap arus

3.3.4. Beban Impedansi

Beban listrik dikenal tahanan R , Kapasitor C atau induktor L . Beban Kapasitor dan induktor jarang digunakan sendiri, yang umum adalah tahanan R digabungkan dengan Kapasitor C atau induktor L **gambar-3.19**. Impedansi (Z) adalah gabungan tahanan R dgn induktor L atau gabungan R dengan Kapasitor C .



Gambar 3.19 :

Persamaan impedansi

$$Z = \frac{U}{I} \quad [Z] = \frac{V}{A} = \Omega$$

- Z Impedansi (Ω)
- U Tegangan efektif (V)
- I Arus efektif (A)

Contoh: Sumber tegangan bolak-balik 100 V, dirangkaikan dengan beban impedansi Z dan menarik arus 80 mA. Hitung besarnya impedansi ?

Jawaban :

Besarnya impedansi $Z = \frac{U}{I} = \frac{100V}{80mA} = 1,25 k\Omega$

- Impedansi (Z) merupakan gabungan antara resistor R dengan komponen induktor (X_L) atau kapasitor (X_C).

3.4. Bilangan Komplek

Bilangan komplek adalah kumpulan titik yang dibentuk oleh bilangan nyata dan bilangan khayal, dalam bidang komplek **gambar-3.20**. Sebuah bilangan komplek dapat dituliskan dalam bentuk:

$$W = a + jb$$

- a bilangan nyata
- b bilangan khayal

Contoh :

Dalam bilangan komplek ada lima jenis operasi yang sering digunakan, yaitu *kesamaan, penjumlahan, pengurangan, perkalian dan pembagian*.

Misalkan diketahui dua bilangan komplek

$$\begin{aligned} P &= a + jb \\ Q &= c + jd \end{aligned}$$

a. Kesamaan

Dua bilangan komplek adalah sama jika dan hanya jika bilangan nyata dan bilangan khayalnya sama.

$$P = Q \quad \text{bila} \quad a = b \quad \text{dan} \quad c = d$$

b. Pengurangan

Penjumlahan dua bilangan kompleks adalah dengan menjumlahkan masing-masing bilangan nyata dan bilangan khayalnya.

$$P + Q = (a + c) + j(c + d)$$

c. Pengurangan

Pengurangan dua bilangan kompleks adalah dengan mengurangkan masing-masing bilangan nyata dan bilangan khayalnya.

$$P - Q = (a - c) + j(c - d)$$

d. Perkalian

Perkalian dua bilangan kompleks dilakukan seperti perkalian aljabar biasa, kemudian hasil kali yang sejenis dijumlahkan

$$\begin{aligned} P \cdot Q &= (a + jb) \cdot (c + jd) \\ &= ac + j^2 bd + jbc + jad \\ &= (ac - bd) + j(bc + ad) \end{aligned}$$

e. Pembagian

Pembagian dua bilangan kompleks dilakukan dengan menggunakan kompleks sekawan dari pembagi, dengan kata lain bilangan khayal pada pembagi diusahakan hilang.

$$\begin{aligned} \frac{P}{Q} &= \frac{a + jb}{c + jd} = \frac{a + jb}{c + jd} \cdot \frac{c - jd}{c - jd} \\ &= \frac{(ac + bd) + j(bc - ad)}{c^2 + d^2} \\ &= \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + j \frac{bc + ad}{c^2 - d^2} \end{aligned}$$

Bilangan kompleks memiliki besaran dan arah sudut **gambar-3.21**.

$$\begin{aligned} W &= a + jb \\ &= M \cos \theta + j M \sin \theta \\ &= M(\cos \theta + j \sin \theta) \end{aligned}$$

M Modulus harga sebenarnya bilangan kompleks

θ Sudut arah dari bilangan kompleks

Bila bilangan kompleks dituliskan dalam bilangan Polar menjadi :

$$\begin{aligned} W &= a + jb \\ &= M(\cos \theta + j \sin \theta) \\ &= M \angle \theta \end{aligned}$$

Dimana :

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

$$\theta = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{b}{a}$$

Untuk penulisan dengan bilangan eksponensial menggunakan dasar *theorema Euler*.

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$$

Jadi persamaan eksponensial menjadi :

$$\begin{aligned} W &= a + jb \\ &= M(\cos \theta + j \sin \theta) \\ &= M \angle \theta \\ &= M \cdot e^{j\theta} \end{aligned}$$

Contoh : Sebuah impedansi dituliskan bilangan kompleks $Z = (5 + j4)\Omega$, tuliskan dalam bentuk polar

Jawaban :

$$Z = \sqrt{5^2 + 4^2} = \sqrt{41} = 6,403$$

$$\theta = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{4}{5} = 38,66^\circ$$

$$\begin{aligned} Z &= (5 + j4)\Omega \\ &= M \angle \theta = 6,403 \Omega \angle 38,66^\circ \end{aligned}$$

Contoh :

Suatu besaran dinyatakan dalam tiga bilangan yang berbeda, yaitu besaran polar, besaran kompleks dan besaran eksponensial.

$$A = 20 \angle 53,1^\circ, B = 3 - j4 \text{ dan } C = 10 \cdot e^{-j2/9\pi}$$

Hitunglah : a) A + B, b) A . B c) B - C d) B/C e) B²

Jawaban :

$$\begin{aligned} \text{a) } A + B &= 20 \angle 53,1^\circ + (3 - j4) \\ &= 20 (\cos 53,1^\circ + j \sin 53,1^\circ) + (3 - j4) \\ &= 12 + j 16 + 3 - j4 \\ &= 15 + j12 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } A \cdot B &= 20 \angle 53,1^\circ \cdot (3 - j4) \\ &= 20 \angle 53,1^\circ \cdot 5 \angle -53,13^\circ \\ &= 100 \angle -0,03^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c) } B - C &= (3 - j4) - 10 \cdot e^{-j2/9\pi} \\ &= (3 - j4) - 10 (\cos -j2/9\pi + j \sin -j2/9\pi) \\ &= 3 - j4 - 7,66 + j 6,42 \\ &= -4,66 + j2,42 \end{aligned}$$

$$d) \quad B / C = \frac{3 - j4}{10^{-j\frac{2\pi}{9}}} = \frac{5 \angle -53,13^\circ}{10 \angle -40^\circ} = 0,5 \angle -13,13^\circ$$

$$e) \quad B^2 = (3 - j4)^2 = (5 \angle -53,13^\circ)^2 = 25 \angle -106,26^\circ$$

- Bilangan komplek terdiri dari bilangan nyata dan bilangan khayal
- Bilangan nyata dari komponen resistor, bilangan khayal dari komponen induktor $+j$ dan komponen kapasitor $-j$.
- Dari bilangan komplek bisa ditransformasikan ke bilangan polar atau bilangan eksponensial, atau sebaliknya.
- Sudut diperoleh dari $\text{arc tg } X/R$
- Bilangan polar memiliki besaran dan menyatakan sudut arah
- Bilangan eksponensial memiliki besaran dan eksponensial dengan bilangan pangkat menyatakan arah sudut.

3.4.1. Impedansi dengan Bilangan Komplek

Impedansi dapat dituliskan dengan bilangan komplek, komponen Resistor disebut sebagai bilangan nyata, beda phasa Resistor besarnya 0° . Komponen induktor dinyatakan sebagai bilangan khayal $+j$ karena memiliki sudut 90° , dan Kapasitor dinyatakan sebagai $-j$ karena memiliki sudut -90° .

$$Z = R + jX_L \text{ atau}$$

$$Z = R - jX_C$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \angle \text{arctg} \frac{X}{R} \Omega$$

Contoh : Dua buah impedansi dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, yaitu $Z_1 = (2 + j4)\Omega$ dan $Z_2 = (4 - j12)$. Hitung a) besarnya nilai impedansi masing-masing b) jika keduanya dihubungkan seri hitung impedansi total c) jika keduanya dihubungkan paralel hitung impedansi totalnya.

Jawaban :

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \angle \text{arctg} \frac{X}{R}$$

$$a) \quad Z_1 = (2 + j4)\Omega = \sqrt{(2^2 + 4^2)} = \sqrt{(4+16)} = \sqrt{20} = 4,47$$

$$\text{arc tg} \frac{X}{R} = \text{arc tg} \frac{4}{2} \quad \varphi = 63,44^\circ$$

$$Z_1 = 4,47 \angle 63,44^\circ \Omega$$

$$Z_2 = (4 - j12) = \sqrt{(4^2 - 12^2)} = \sqrt{(16+144)} = \sqrt{160} = 12,65$$

$$\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{X}{R} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{-12}{4} \quad \varphi = -71,57^\circ$$

$$Z_2 = 12,65 \angle -71,57^\circ \Omega$$

b). Impedansi Z1 seri dengan Z2, besarnya $Z_t = Z1 + Z2$

$$Z_t = (2 + j4) + (4 - j12) = (6 - j8) \Omega = 10 \angle -53,13^\circ \Omega$$

c). Impedansi Z1 paralel Z2, besarnya $Z_t = Z1//Z2$

$$Z_t = \frac{Z1 \cdot Z2}{Z1 + Z2}$$

$$Z1 \cdot Z2 = 4,47 \angle 63,44^\circ \Omega \cdot 12,65 \angle -71,57^\circ \Omega = 56,55 \angle -8,13^\circ \Omega$$

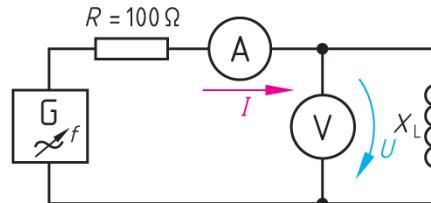
$$Z1 + Z2 = (2 + j4) + (4 - j12) = (6 - j8) \Omega = 10 \angle -53,13^\circ \Omega$$

$$Z_t = \frac{Z1 \cdot Z2}{Z1 + Z2} = \frac{56,55 \angle -8,13^\circ}{10 \angle -53,13^\circ} = 5,655 \angle 45^\circ \Omega$$

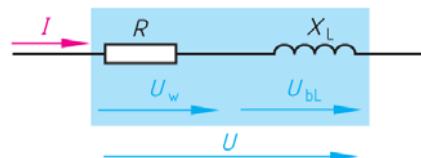
- Impedansi (Z) merupakan gabungan antara resistor R dengan
- Bilangan kompleks terdiri komponen nyata dan imajiner ($R+jX$)
- Komponen nyata adalah resistor, komponen imajiner $+j$ untuk induktor dan $-j$ untuk kapasitor. ($R+jX_L$) atau ($R-jX_C$)
- Bilangan kompleks memiliki komponen besar dan sudut

3.5. Rangkaian Resistor Seri Induktor dengan Listrik AC

Sumber tegangan bolak-balik dengan frekuensi sinusoida dapat diatur dari 1 Hz, dirangkaiakan dengan Resistor $R = 100 \Omega$ dan induktor X_L **gambar-3.22**. Arus sebesar I akan mengalir melalui Resistor R dan Induktor X_L . Maka terjadi drop tegangan di Resistor U_W dan drop tegangan di induktor U_{BL} , jika kedua tegangan dijumlahkan sama dengan tegangan sumber U **gambar-3.23**.



Gambar 3.22 : Resistor seri Induktor listrik AC



Gambar 3.23 : Seri Resistor dengan Induktor

Drop tegangan Resistor U_W digambarkan dengan garis horizontal (arus sephasa dengan tegangan pada Resistor R). Drop tegangan pada induktor U_{BL} berbeda sudut phasa 90° posisi mendahului (*leading*) terhadap U_W . Tegangan U merupakan jumlah vektor tegangan U_W dengan U_{BL} **gambar-3.24**.

Cara menggambar segitiga tegangan lihat langkah dari nomor 1 sampai nomor 6 **gambar-3.25**. Langkahnya sebagai berikut :

1. Buat skala tegangan $4V = 1 \text{ cm}$ dan skala arus $5\text{mA} = 1 \text{ cm}$.
2. Tarik garis arus sebagai referensi
3. Tarik garis drop tegangan Resistor U_W
4. Tarik garis drop tegangan induktor U_{BL} sudut 90° dari U_W , tarik garis paralel U_{BL} dari ujung garis U_W .
5. Tarik garis miring antara titik 0 ke ujung garis sejajar U_{BL} , sebagai resultante tegangan U_W dan U_{BL} .
6. Menghitung sudut ϕ .

$$\delta = 90^\circ - \phi \Rightarrow \tan \delta = \frac{U_W}{U_{BL}} \Rightarrow \frac{U_W}{U_{BL}} = \frac{R}{X_L}$$

$$\tan \delta = d \Rightarrow d = \frac{R}{X_L}; Q = \frac{1}{d} \Rightarrow Q = \frac{X_L}{R}$$

$$\sin \phi = \frac{U_{BL}}{U} \Rightarrow U_{BL} = U \cdot \sin \phi$$

$$\cos \phi = \frac{U_W}{U} \Rightarrow U_W = U \cdot \cos \phi$$

ϕ Beda sudut phasa

U Tegangan efektif (V)

I Arus efektif (A)

δ Sudut ($90^\circ - \phi$)

U_W Drop tegangan Resistor (V)

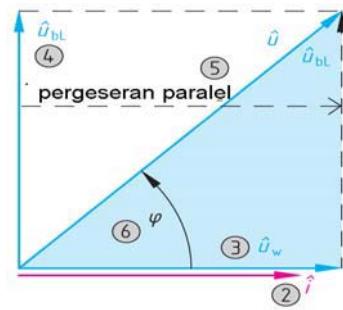
U_{BL} Drop tegangan induktor (V)

R Resistor (Ω)

X_L Reaktansi induktif (Ω)

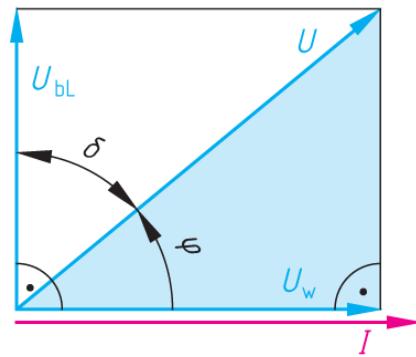
d Ratio R/X_L

Q Ratio X_L/R

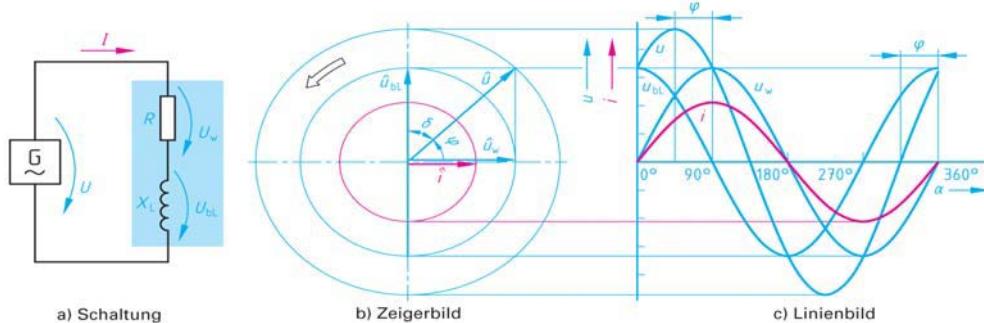


① Skala : $4 \text{ V} \approx 1 \text{ cm}$
 $5 \text{ mA} \approx 1 \text{ cm}$

Gambar 3.24 : Vektor tegangan dengan skala



Gambar 3.25 : Segitiga tegangan Resistor seri Induktor



Gambar 3.26 : Bentuk gelombang tegangan beban Resistor dan Induktor

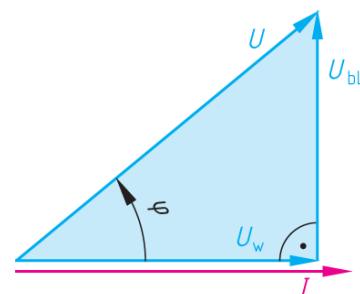
Rangkaian Resistor R seri dengan induktor X_L pada sumber tegangan AC, pada Resistor terjadi drop tegangan U_W dan pada ujung induktor drop tegangan U_{BL} **gambar-3.26a**. Diagram lingkaran memiliki tiga lingkaran, lingkaran terluar menyatakan tegangan sumber U , lingkaran tengah menyatakan drop tegangan U_W dan U_{BL} , lingkaran dalam menyatakan besaran arus i **gambar-3.26b**. Bentuk gelombang arus i dan drop tegangan Resistor U_W dijadikan referensi, tegangan sumber U mendahului terhadap arus i sebesar ϕ **gambar-3.26c**.

- Bilangan kompleks terdiri komponen nyata dan imajiner ($R+jX$)
- Komponen nyata adalah resistor, komponen imajiner $+j$ untuk induktor dan $-j$ untuk kapasitor. $(R+jX_L)$ atau $(R-jX_C)$
- Sudut diperoleh dari arc tg X/R

3.5.1. Segitiga Tegangan

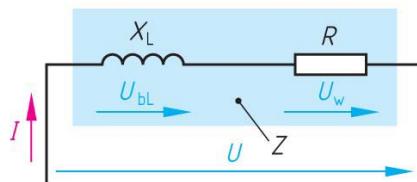
Tegangan U_W , U_{BL} dan U membentuk segitiga **gambar-3.27**, dengan sudut ϕ antara tegangan U_W dan U . Beban dengan induktor X_L di seri dengan Resistor R bila dialiri arus AC, terjadi drop tegangan U_{BL} dan U_W . Tegangan U merupakan penjumlahan secara vektor tegangan U_W dan U_{BL} .

Tegangan U_W sephasa dengan arus I , artinya setiap beban Resistor memiliki sifat sephasa antara tegangan dan arusnya. Sudut phasa ϕ merupakan beda antara tegangan U dengan arus I , selanjutnya dapat dilanjutkan menghitung faktor kerja $\cos \phi$.

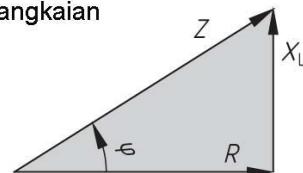


Gambar 3.27 Segitiga daya

Beban induktor X_L dan Resistor R **gambar-3.28a** dapat membentuk komponen segitiga. Komponen R digambarkan horizontal, induktor X_L berbeda 90° dari Resistor, hasilnya adalah impedansi Z **gambar-3.28b**.



a. Rangkaian



b. Segitiga impedansi

Impedansi dapat dihitung :

$$X_L = \frac{U_{BL}}{I} \quad R = \frac{U_w}{I}$$

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$R = Z \cdot \cos \varphi \quad X_L = Z \cdot \sin \varphi$$

Gambar 3.28: Segitiga
impedansi

X_L Reaktansi induktif (Ω)

Z Impedansi (Ω)

U_{BL} Drop tegangan induktor (V)

U_w Drop tegangan Resistor (V)

I Arus beban (A)

U Tegangan sumber (V)

φ Sudut beda phasa

Contoh : Rangkaian **gambar-3.28a** Resistor $R = 1 \text{ k}\Omega$, diberikan tegangan AC 24 V dipasang Ampermeter dan terukur 4,8 mA. Hitung besarnya impedansi Z , besarnya induktor X_L dan drop tegangan pada Resistor U_w dan drop tegangan induktor U_{BL} ?.

Jawaban :

a) $Z = \frac{U}{I} = \frac{24V}{4,8mA} = 5.000\Omega = 5k\Omega$

b) $X_L^2 = Z^2 - R^2 \Rightarrow X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{(5000\Omega)^2 - (1000\Omega)^2} = 4.900\Omega$

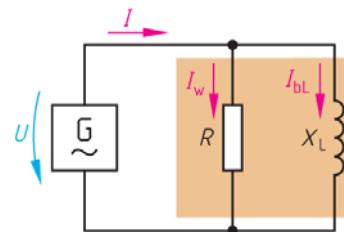
c) $U_w = I \cdot R = 4,8mA \cdot 1000\Omega = 4,8V$

$U_{BL} = I \cdot X_L = 4,8mA \cdot 4900\Omega = 23,5V$

- Rangkaian seri Resistor dan Induktor dengan sumber listrik AC akan terjadi drop tegangan pada masing-masing, dan terjadi pergeseran phasa kedua tegangan sebesar 90° .
- Ada pergeseran sudut phasa antara tegangan dan arus sebesar φ

3.5.2. Rangkaian Resistor Paralel Induktor listrik AC

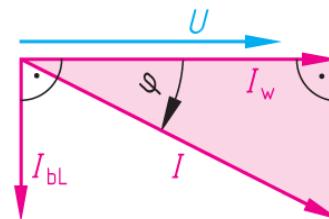
Komponen Resistor R diparalel dengan induktor X_L , diberikan sumber tegangan AC sinusida **gambar-3.29**. Berlaku hukum arus Kirchhoff, jumlah arus yang masuk I sama dengan jumlah arus yang keluar I_W dan I_{BL} .



Arus melewati Resistor I_W digambarkan garis horizontal, arus yang melewati induktor I_{BL} berbeda sudut phasa 90° . Arus total I merupakan penjumlahan vektor arus Resistor I_W dan arus induktor I_{BL} **gambar-3.30**. Perbedaan sudut phasa antara arus Resistor I_W dan arus total I sebesar φ .

Arus I_W yang mengalir ke Resistor R digambar sephasa dengan tegangan sumber U .

Gambar 3.29 : Resistor parallel Induktor



$$I = \sqrt{I_W^2 + I_{BL}^2}$$

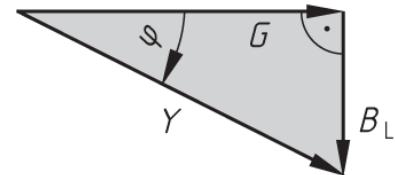
$$Y = \sqrt{G^2 + B_L^2}$$

Admitansi dengan simbol (Y) merupakan kebalikan dari impedansi (Z), memiliki dua komponen lainnya, yaitu *Konduktansi* (G) dan *Suszeptansi* (B_L) yang merupakan bilangan komplek.

$$Y = \frac{1}{Z} \quad G = \frac{1}{R} \quad B_L = \frac{1}{X_L}$$

- I Arus total (A)
- I_W Arus cabang Resistor (A)
- I_{BL} Arus cabang induktor (A)
- Y Admitansi (mho, Ω^{-1})
- G Konduktansi (mho, Ω^{-1})
- B_L Suszeptansi (mho, Ω^{-1})
- Z Impedansi (Ω)
- R Resistor (Ω)
- X_L Reaktansi induktif (Ω)

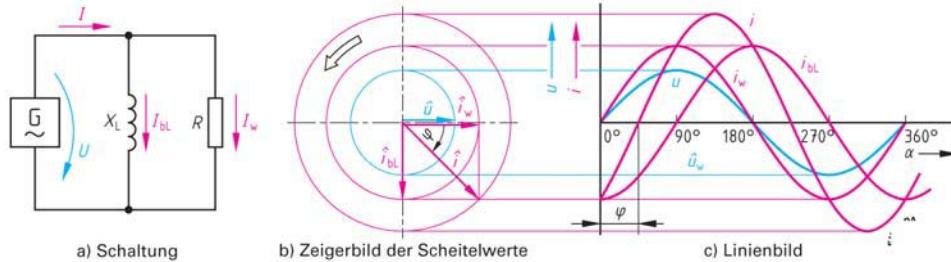
Gambar 3.30 : Segitiga arus



Gambar 3.31: Segitiga konduktansi, suszeptansi dan admitansi

Rangkaian paralel Resistor dan induktor diberikan tegangan AC, mengalir dua cabang arus yang lewat induktor I_{BL} dan yang melewati Resistor I_W **gambar - 3.32a**. Diagram lingkaran memiliki tiga jari-jari lingkaran berbeda, jari-jari terluar

menyatakan arus total I , jari-jari lingkaran tengah menyatakan arus Resistor I_W , dan jari-jari lingkaran terdalam sumber tegangan U **gambar-3.32b**. Grafik tegangan sinusodal memperlihatkan gelombang tegangan sumber U dengan arus total I berbeda sudut phasa φ . Tegangan U sephasa dengan arus Resistor I_W , dengan arus induktor I_{BL} berbeda 90° .



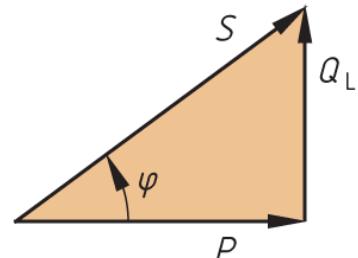
Gambar 3.32 : Bentuk arus beban Resistor parallel Induktor

Rangkaian paralel resistor dan induktor dengan sumber tegangan AC menghasilkan cabang arus resistor I_W sebagai referensi, arus cabang induktor berbeda sudut phasa sebesar 90° terhadap arus I_W , arus total merupakan penjumlahan arus cabang resistor dan arus cabang induktor.

3.5.3. Daya Listrik AC

Dalam listrik AC ada tiga jenis daya, khususnya untuk beban yang memiliki impedansi (Z) **gambar-3.33**:

- Daya semu (S , VA, Volt Amper)
- Daya aktif (P , W, Watt)
- Daya reaktif (Q_L , VAR, Volt Amper Reaktif)



Dalam arus searah tidak dikenal daya semu dan daya reaktif, yang ada hanya daya saja.

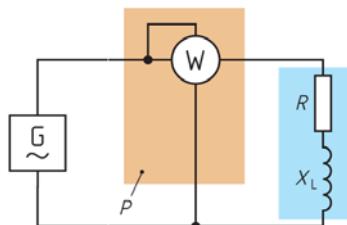
Gambar 3.33 : Segitiga Daya Aktif, Reaktif dan Semu

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = V^2 / R \quad (\text{watt})$$

Beban impedansi arus bolak balik memiliki tiga jenis daya, yaitu daya semu satuan Volt-amper, daya aktif dengan satuan Watt, dan daya reaktif dengan satuan Volt-amper-reaktif.

3.5.4. Daya Aktif

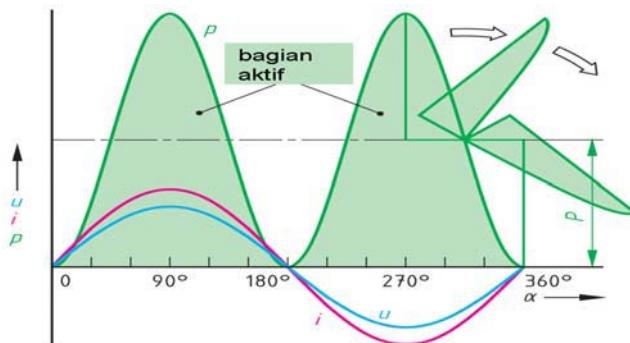
Untuk rangkaian listrik AC, bentuk gelombang tegangan dan arus sinusoida, besarnya daya setiap saat tidak sama. Maka daya merupakan daya rata-rata diukur dengan satuan Watt dan diukur dengan alat ukur Wattmeter **gambar-3.34**.



Gambar 3.34 : Pengukuran daya dengan wattmeter

Beban Resistor R grafik tegangan U dengan arus i sephasa **gambar-3.35** dimana perbedaan sudut phasanya 0° , faktor kerja $\cos \alpha = 1$. sehingga besarnya daya sesaat adalah $p = u \cdot i$ yang keduanya bernilai positif.

Pada beban resistif, dimana tidak mengandung induktor grafik gelombang tegangan U dan arus sephasa, sehingga besarnya daya sebagai perkalian tegangan dan arus menghasilkan dua gelombang yang keduanya bernilai positif. Besarnya daya aktif adalah P (periksa **gambar-3.35**). Sisa puncaknya dibagi dua untuk mengisi celah-celah kosong sehingga kedua rongga terisi oleh dua puncak yang mengisinya.



Gambar 3.35 : Daya diklep beban resistif

Persamaan daya aktif (P) beban resistif :

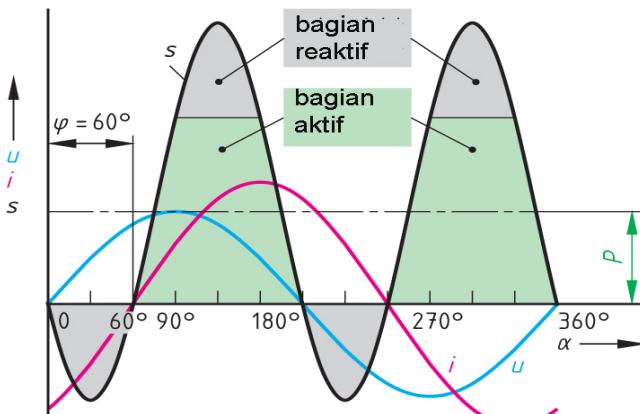
$$P = \frac{1}{2} \cdot \hat{p} = \frac{1}{2} \cdot \hat{u} \cdot \hat{i} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot U \cdot \sqrt{2} \cdot I = U \cdot I$$

P Daya (watt)

$\hat{p}, \hat{i}, \hat{u}$ Harga maksimum, daya, arus dan tegangan

U, I Harga efektif : tegangan dan arus

Pada beban impedansi, dimana disamping mengandung Resistor juga terdapat komponen induktor. Gelombang tegangan mendahului gelombang arus sebesar $\varphi = 60^\circ$ **gambar-3.36**. Perkalian gelombang tegangan dan gelombang arus menghasilkan dua puncak positif yang besar dan dua puncak negatif yang kecil. Pergeseran sudut phasa tergantung seberapa besar komponen induktornya.



Gambar 3.36 : Daya aktif beban impedansi

Persamaan daya aktif pada beban induktif :

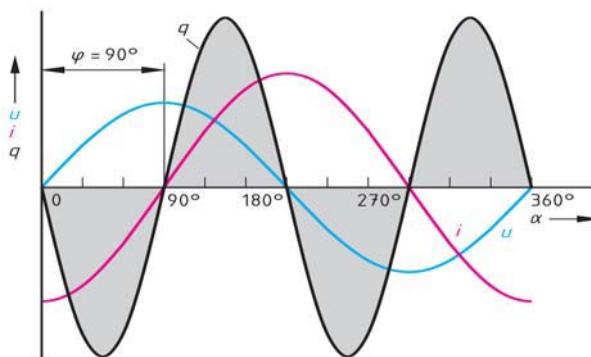
$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Contoh : Lampu TL dipasang pada tegangan 220 V dan menarik arus 0,5 A dan faktor kerja besarnya 0,6. Hitunglah daya aktifnya.

Jawaban :

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 220V \cdot 0,5A \cdot 0,6 = 66 \text{ Watt}$$

Apa yang terjadi jika beda sudut phasa antara tegangan dengan arus $\varphi = 90^\circ$? Penjelasan fenomena ini **gambar-3.37** ketika tegangan dan arus beda sudut phasa 90° . Daya aktifnya sebagai perkalian tegangan dan arus hasilnya sama antara daya sisi negatif dan daya positifnya, dengan kata lain dayanya sama dengan nol.



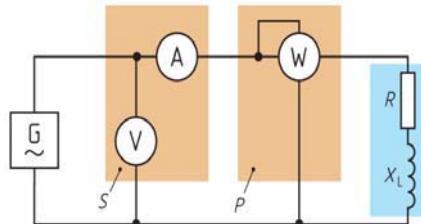
Gambar 3.37 : Daya aktif beban induktif

- Daya aktif dinyatakan dengan satuan watt, pada beban resistif daya aktif merupakan daya nyata yang diubah menjadi panas.
- Pada beban impedansi daya nyata hasil kali tegangan dan arus dan faktor kerja ($\cos \phi$).
- Pada beban dimana pergeseran phasa tegangan dan arus sebesar 90° , maka daya aktif akan menjadi nol

3.5.5. Daya Semu

Mengukur daya aktif beban impedansi (Resistor R seri dan induktor X_L) dilakukan dengan Wattmeter **gambar-3.38**. Daya semu merupakan perkalian tegangan dengan arus, satuan VA (Volt-Amper). Tegangan di ukur dengan Voltmeter, arus diukur dengan Ampermeter.

$$S = U \cdot I \quad [S] = V \cdot A = VA^1$$



Gambar 3.38: Pengukuran arus, tegangan, dan wattmeter

S Daya semu (VA, volt-amper)

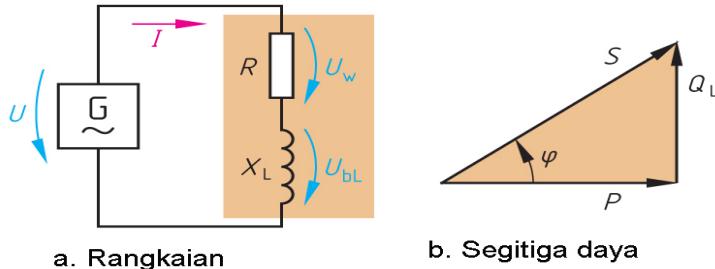
U Tegangan efektif (V)

I Arus efektif (A)

Daya semu dinyatakan dengan satuan Volt-Amper, menyatakan kapasitas peralatan listrik. Pada peralatan generator dan Transformator kapasitas dinyatakan dengan daya semu atau KVA.

3.5.6. Segitiga Daya Beban Induktif

Beban induktif dapat digambarkan dengan dua kondisi, yaitu Resistor R seri dengan induktor X_L dan Resistor R paralel dengan induktor X_L . Sumber tegangan AC dengan beban Resistor seri induktor **gambar-3.39a** mengalir arus I .



Gambar 3.39 : Rangkaian R Seri dan Segitiga Daya

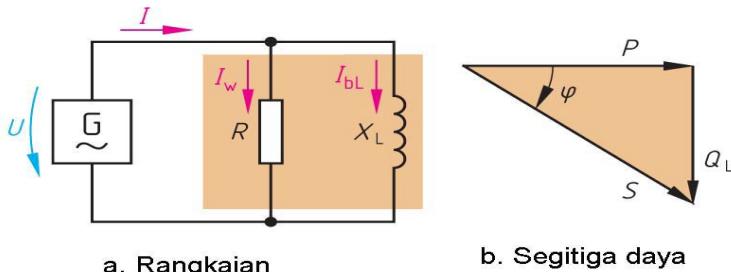
Pada Resistor terjadi drop tegangan U_W dan drop tegangan induktor U_{BL} . Daya yang terjadi pada rangkaian **gambar-3.39b**, yaitu daya semu, daya aktif dan daya reaktif.

$$S = U \cdot I \quad (\text{VA, volt-amper})$$

$$P = U_W \cdot I \quad (\text{W, watt})$$

$$Q_L = U_{BL} \cdot I \quad (\text{VAR, volt-amper-reaktif})$$

Beban induktif bisa juga terjadi dimana Resistor R terhubung secara paralel dengan induktor X_L **gambar-3.40a**. Arus yang mengalir melewati Resistor sebesar I_W dan arus cabang melewati induktor I_{BL} . Daya yang terjadi pada rangkaian tersebut mencakup kita sebut segitiga daya mencakup daya semu, daya aktif dan daya reaktif **gambar-3.40b**.



Gambar 3.40 : Rangkaian R Paralel dan Segitiga Daya

Daya aktif P dengan garis horizontal, daya reaktif Q berbeda sudut 90° , daya semu penjumlahan aljabar P dan Q . Sudut α antara P dan S merupakan faktor kerja.

$$S^2 = P^2 + Q_L^2 \Rightarrow S = \sqrt{P^2 + Q_L^2}$$

$$S = U \cdot I \quad (\text{VA})$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \Rightarrow P = S \cdot \cos \varphi$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (\text{W})$$

$$\sin \varphi = \frac{Q_L}{S} \Rightarrow Q_L = S \cdot \sin \varphi \quad Q_L = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (\text{VAR})$$

$$\tan \varphi = \frac{Q_L}{P} \quad Q_L = P \cdot \tan \varphi$$

S Daya semu

P Daya aktif

Q_L Daya reaktif

φ Faktor kerja

Contoh: Beban induktif dihubungkan dengan tegangan AC 24 V, menarik arus 2,5 A dan terukur faktor kerja 0,9. Hitung Daya semu, daya aktif dan daya reaktif.

Jawaban :

$$S = U \cdot I = 24V \cdot 2,5A = \mathbf{60 \text{ VA}}$$

$$P = S \cdot \cos \varphi = 60\text{VA} \cdot 0,9 = \mathbf{54 \text{ W}}$$

$$Q_L = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{60^2(\text{VA})^2 - 54^2\text{W}^2} = \mathbf{26,15 \text{ VAR}}$$

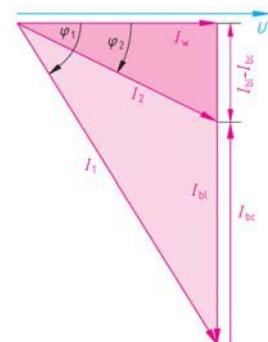
$$\cos \varphi = 0,9 \Rightarrow \varphi = \mathbf{25,84^\circ}$$

Segitiga daya menyatakan komponen daya aktif (P), daya reaktif (Q) dan daya semu (S). Resistor seri induktor diberi tegangan AC, berbeda dalam menggambarkan segitiga daya dengan beban resistor paralel dengan induktor.

3.5.7. Faktor Kerja

Impedansi mengandung komponen resistansi R dan induktor XL . Dari kedua komponen tersebut menyebabkan antara tegangan dan arus terjadi pergeseran sudut phasa. Faktor kerja adalah konstanta dari nilai cosinus dari sudut pergeseran phasa **gambar-3.41**. Nilai faktor kerja berkisar 0,0 sampai 1,0.

Beban induktif las memiliki faktor kerja rendah 0,3 s/d 0,5. Lampu TL memiliki faktor kerja 0,5 sd 0,7. Motor listrik dan transformator memiliki faktor kerja 0,8 sampai



Gambar 3.41 :
Diagram Faktor Kerja

0,9. Sedangkan lampu pijar memiliki faktor kerja 1,0.

Makin rendah faktor kerja berakibat daya reaktifnya makin membesar, sebaliknya makin besar nilai faktor kerja daya reaktif menuju nol.

Persamaan faktor kerja adalah:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad \sin \varphi = \frac{Q_L}{S}$$

$\cos \varphi$ Faktor kerja

P Daya aktif (W)

S Daya semu (VA)

$\sin \varphi$ Faktor reaktif

Q_L Daya reaktif induktif (VAR)

Contoh : Sekelompok lampu pijar dengan tegangan 220V/58 W, digabungkan dengan beberapa lampu TL 11 W, ada 20 buah lampu pijar dan lampu TL. Faktor kerja terukur sebesar $\cos \alpha_1 = 0,5$. Hitunglah daya semu dari beban dan besarnya arus I_1 sebelum kompensasi, Jika diinginkan faktor kerja menjadi $\cos \alpha_2=0,9$ hitung besarnya arus I_2 (setelah kompensasi) **gambar-35**.

Jawaban :

a) Besarnya daya lampu gabungan

$$P_1 = 58W + 11W = 69 W$$

$$P_G = 20 \times 69W = 1.380 W = 1,38 kW$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_G}{S_1} \Rightarrow S_1 = \frac{P_G}{\cos \varphi_1} = \frac{1,38kW}{0,5} = 2.760 VA = 2,76 kVA$$

$$I_1 = \frac{S_1}{U} = \frac{2760VA}{220V} = 12,54 A \text{ (sebelum kompensasi)}$$

$$b) S_2 = \frac{P_G}{\cos \varphi_2} = \frac{1,38kW}{0,9} = 1,53 kVA$$

$$I_2 = \frac{S_2}{U} = \frac{1530VA}{220V} = 6,95 A \text{ (setelah kompensasi)}$$

Faktor kerja menggambarkan sudut phasa antara daya aktif dan daya semu.
Faktor kerja yang rendah merugikan mengakibatkan arus beban tinggi.
Perbaikan faktor kerja menggunakan kapasitor.

3.6. Rangkaian Resistor Seri dengan Kapasitor

Resistor yang dihubungkan seri dengan Kapasitor akan menjadi beban impedansi, mengandung komponen Resistor R dan komponen kapasitif X_C . Sumber tegangan AC yang dihubungkan seri R dan X_C akan mengalirkan arus I , pada Resistor terjadi drop tegangan U_W dan drop tegangan di Kapasitor U_{BC} **gambar-3.42.**

Tegangan U_W posisi horizontal, tegangan U_{BC} dengan sudut 90° tegak lurus, tegangan sumber U merupakan jumlah vektor tegangan U_W dengan U_{BC} . Resistor R diposisikan datar, reaktansi X_C dengan sudut 90° tegak lurus, impedansi Z merupakan jumlah vektor R dengan X_C . Daya aktif P posisi datar, daya reaktif Q tegak sudut 90° dan daya semu S merupakan penjumlahan vektor P dengan Q .

$$U^2 = U_W^2 + U_{bc}^2 \quad U = \sqrt{U_W^2 + U_{bc}^2}$$

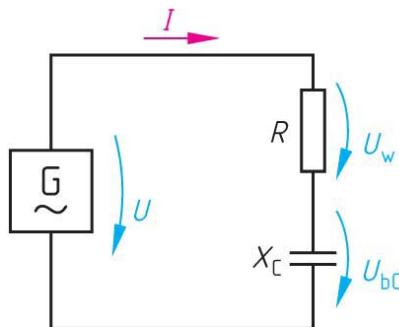
$$Z^2 = R^2 + X_C^2 \quad Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$[Z] = \Omega$

$$S^2 = P^2 + Q_C^2 \quad S = \sqrt{P^2 + Q_C^2}$$

$[S] = VA$

X_C	Reaktansi kapasitif (Ω)
U_{BC}	Drop tegangan Kapasitor (V)
I	Arus (A)
f	Frekuensi (Hz)
C	Kapasitor (F)
ω	Kecepatan sudut (Rad)
U	Tegangan sumber (V)
U_W	Drop tegangan Resistor (V)
Z	Impedansi (Ω)
R	Resistor (Ω)
S	Daya semu (VA)
P	Daya aktif (W)
Q_C	Daya reaktif (VAR)



Gambar 3.42 : Resistor seri kapasitor

Contoh : Kapasitor memiliki reaktansi $X_C = 35 \Omega$, dirangkai seri dengan Resistor $R = 25 \Omega$. Hitung besarnya impedansi.

Jawaban :

$$Z^2 = R^2 + X_C^2 \Rightarrow Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{(25\Omega)^2 + (35\Omega)^2} = 43 \Omega$$

Resistor seri kapasitor menyebabkan arus akan mendahului (leading) tegangan sumber.

3.6.1. Rangkaian Resistor Paralel Kapasitor

Kapasitor X_C dan Resistor R dalam rangkaian paralel, dihubungkan dengan sumber tegangan AC 50Hz **gambar-3.43a**. Menghasilkan arus cabang Kapasitor I_{BC} dan arus cabang melewati Resistor I_W . Arus total I merupakan jumlah vektor I_{BC} dengan I_W .

Persamaan arus Kapasitor

$$I^2 = I_W^2 + I_{BC}^2$$

$$I = \sqrt{I_W^2 + I_{BC}^2}$$

$$I_W = I \cdot \cos \varphi$$

$$I_{BC} = I \sin \varphi$$

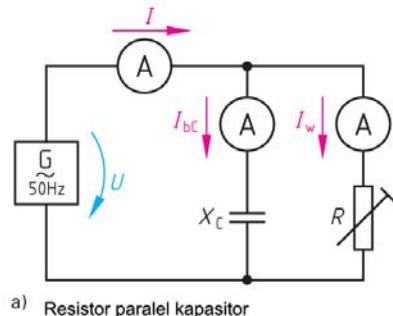
$$\tan \varphi = \frac{I_{BC}}{I_W}$$

I Arus (A)

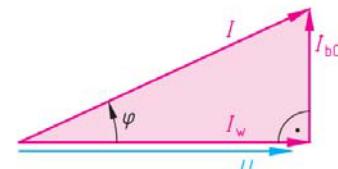
I_W Arus cabang Resistor (A)

I_{BC} Arus cabang Kapasitor (A)

φ Sudut phasa



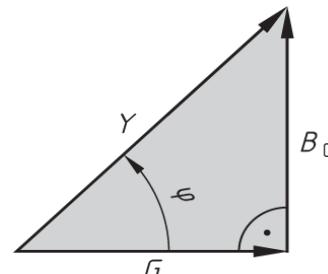
a) Resistor paralel kapasitor



b) Segitiga Arus

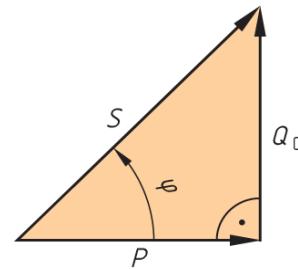
Gambar 3.43 : Rangkaian Resistor paralel kapasitor

Jika impedansi Z memiliki sifat menghambat arus, kebalikannya adalah admitansi Y memiliki sifat menghantarkan arus. Resistor R memiliki sifat menghambat arus, kebalikannya adalah konduktansi G . Reaktansi X_C kebalikannya adalah suseptansi B_C . Hubungan konduktansi G , suseptansi B_C dan admitansi Y digambarkan sebagai segitiga dengan sudut φ **gambar-3.44**. Segitiga daya aktif P , daya reaktif Q_C dan daya semu S memiliki sudut faktor daya sebesar φ .



Gambar 3.44 : Segitiga Admitansi

$$\begin{aligned} Y &= \sqrt{G^2 + B_C^2} & S &= \sqrt{P^2 + Q_C^2} \\ \cos \varphi &= \frac{G}{Y}; \sin \varphi = \frac{B_C}{Y} & \cos \varphi &= \frac{P}{S}; \sin \varphi = \frac{Q_C}{S} \\ Y &= \frac{I}{U} = \frac{1}{Z} & S &= U \cdot I \\ G &= \frac{I_w}{U} = \frac{1}{R} & P &= U \cdot I_w \\ B_C &= \frac{I_{bc}}{U} = \frac{1}{X_C} & Q_C &= U \cdot I_{bc} \end{aligned}$$



Gambar 3.45: Segitiga Daya

Y	Admitansi (mho, Ω^{-1})	I_{BC}	Arus cabang Kapasitor (A)
G	Konduktansi (mho, Ω^{-1})	X_C	Reaktansi kapasitif (Ω)
B_C	Suseptansi (mho, Ω^{-1})	f	Frekuensi (Hz)
I	Arus (A)	C	Kapasitor (F)
U	Tegangan (V)	P	Daya aktif (W)
Z	Impedansi (Ω)	Q_C	Daya reaktif (VAR)
I_w	Arus cabang Resistor (A)		
R	Resistor (Ω)		

Rangkaian resistor paralel kapasitor, memiliki dua cabang arus. Pertama cabang arus resistor menjadi referensi dan kedua cabang arus kapasitor mendahului tegangan sebesar 90° . Arus total sebagai penjumlahan vektor cabang arus resistor dan cabang arus kapasitor.

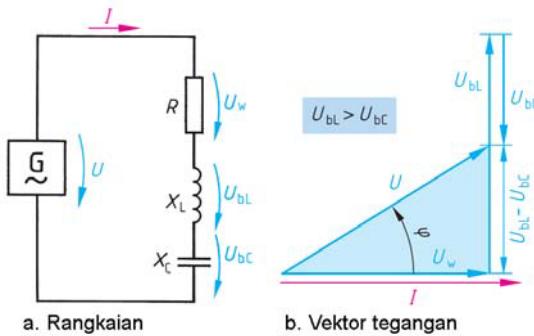
3.6.2. Rangkaian Resistor Seri Induktor dan Kapasitor

Rangkaian seri Resistor R , induktor X_L dan Kapasitor X_C dengan sumber tegangan AC **gambar-3.46a**. Arus yang mengalir ke rangkaian sebesar I , menyebabkan drop tegangan di Resistor U_W , drop tegangan di induktor U_{bL} dan drop tegangan di Kapasitor U_{bC} . Dalam kondisi ini drop tegangan $U_{bL} > U_{bC}$.

Diagram vektor **gambar-3.46b** tegangan U_W mendatar, sedangkan tegangan U_{bL} tegak lurus dari U_W arahnya keatas, sedangkan U_{bC} arahnya kebawah dari ujung U_{bL} . Karena arah tegangan berbeda, dicari selisih tegangannya sebesar ($U_{bL} - U_{bC}$). Hasilnya tegangan U merupakan penjumlahan vektor tegangan U_W dengan tegangan ($U_{bL} - U_{bC}$).

$$U^2 = U_W^2 + (U_{bL} - U_{bC})^2 \rightarrow \\ U = \sqrt{U_W^2 + (U_{bL} + U_{bC})^2}$$

- U Tegangan (V)
- U_W Drop tegangan Resistor (V)
- U_{bL} Drop tegangan induktor (V)
- U_{bC} Drop tegangan Kapasitor (V)



Gambar 3.46 : Rangkaian Seri R, L, C dan Diagram Vektor Tegangan

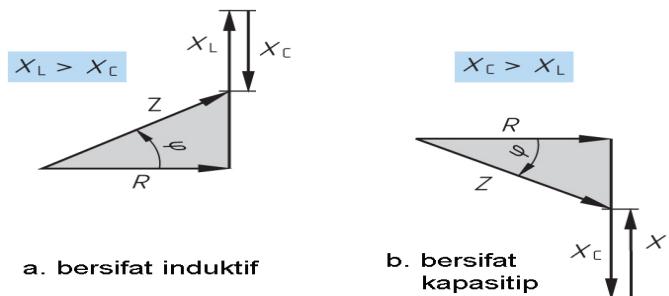
Contoh : Rangkaian seri R, XL dan XC terukur tegangan drop $U_W = 10$ V, $U_{bL} = 20$ V, $U_{bC} = 10$ V Hitunglah besarnya tegangan suply U ?

Jawaban :

$$U = \sqrt{U_W^2 + (U_{bL} - U_{bC})^2} \\ U = \sqrt{10^2 + (20-10)^2} \\ U = \sqrt{100+100} = 14,1 \text{ V}$$

Resistor seri induktor dan Kapasitor **gambar-3.47** memunculkan dua kemungkinan ditinjau dari nilai reaktansi, yaitu :

- Kondisi $X_L > X_C$
- Kondisi $X_C > X_L$



Gambar 3.47 : Segitiga Impedansi Induktif dan Kapasitif

Kondisi ketika $X_L > X_C$, artinya rangkaian memiliki sifat lebih induktif, hasilnya tegangan akan mendahului (*lagging*) arus dengan sudut phasa φ . Arah vektor ($X_L - X_C$) keatas terhadap R.

Ketika $X_C > X_L$, artinya rangkaian bersifat kapasitif, yang terjadi adalah arus akan mendahului (*leading*) terhadap tegangan dengan sudut phasa φ . Arah vektor ($X_C - X_L$) kebawah terhadap R.

Persamaan impedansi :

$$Z^2 = R^2 + (X_L + X_C)^2$$

Z Impedansi (Ω)

R Resistor (Ω)

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L + X_C)^2}$$

X_L Reaktansi induktif (Ω)

$$Z = \frac{U}{I}$$

X_C Reaktansi kapasitif (Ω)

Contoh : Rangkaian seri $R = 300\Omega$, induktor $L = 2H$, dan Kapasitor $C = 6\mu F$, dihubungkan dengan sumber tegangan AC, frekuensi = 50 Hz. Hitung besarnya impedansi Z ?

Jawaban :

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot 50 \cdot 2 = 628 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot \frac{1}{6 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{s}{\Omega}} = \frac{10^6}{1885} \Omega = 531 \Omega$$

$$X = (X_L - X_C) = 628 \Omega - 531 \Omega = 97 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{300^2 \Omega^2 + 97^2 \Omega^2} = \sqrt{99409 \Omega^2} = 315 \Omega$$

3.6.3. Paralel R, L, C

Rangkaian paralel Resistor R , induktor X_L dan Kapasitor X_C , dihubungkan dengan sumber tegangan AC **gambar-3.48a**. Ada tiga cabang arus, yaitu I_{BC} lewat Kapasitor, I_{BL} melewati induktor dan I_W melewati Resistor. Arus total I adalah penjumlahan vektor ketiga arus cabang ($I_{BC} + I_{BL} + I_W$)

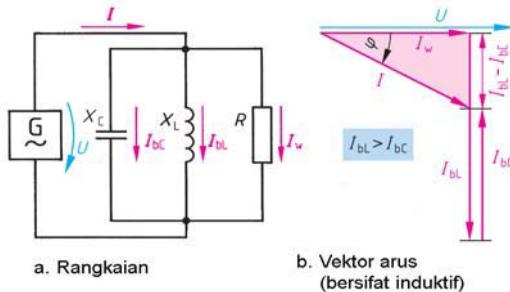
Gambar vektor arus total dan masing-masing arus cabang **gambar-3.48b**, arus cabang I_W melewati R sebagai referensi. Tampak arus cabang induktor I_{BL} lebih besar dibandingkan arus cabang Kapasitor I_{BC} . Arus cabang I_{BL} dan I_{BC} memiliki arah berbeda, maka keduanya diselisihkan ($I_{BL} - I_{BC}$).

Persamaan arus total :

$$I^2 = I_w^2 + (I_{bL} + I_{bC})^2$$

$$I = \sqrt{I_w^2 + (I_{bL} - I_{bC})^2}$$

- I Arus total (A)
- I_W Arus cabang Resistor (A)
- I_{BC} Arus cabang Kapasitor (A)
- I_{BL} Arus cabang induktor (A)



Gambar 3.48 : Rangkaian Paralel R, L, C dan diagram vektor arus

Contoh : Rangkaian paralel dari reaktansi induktor $X_L=1.000 \Omega$, reaktansi Kapasitor $X_C= 1.200 \Omega$, Resistor $R=1.500 \Omega$, dihubungkan dengan sumber tegangan AC 100 V. Hitunglah besarnya arus cabang, dan besar arus total.

Jawaban :

$$I_w = \frac{U}{R} = \frac{100V}{1500\Omega} = 0,067 \text{ A}$$

$$I_{bC} = \frac{U}{X_C} = \frac{100V}{1200\Omega} = 0,0833 \text{ A}$$

$$I_{bL} = \frac{U}{X_L} = \frac{100V}{1000\Omega} = 0,1 \text{ A}$$

$$I = \sqrt{I_w^2 + (I_{bL} - I_{bC})^2} = \sqrt{(0,067A)^2 + (0,1A - 0,0833A)^2}$$

$$I = \sqrt{0,00478A^2} = 0,0691 \text{ A} = 69,1 \text{ mA}$$

Dalam hubungan paralel Resistor, induktor dan Kapasitor ada dua kondisi yang terjadi :

- Kondisi ketika $I_{BL} > I_{BC}$
- Kondisi ketika $I_{BC} > I_{BL}$

Ketika $I_{BL} > I_{BC}$ dijelaskan pada **gambar 3.48b** diatas. Vektor arus I_{BL} arahnya kebawah lebih besar dari pada arus I_{BC} . Sehingga selisih arus cabang ($I_{BL} - I_{BC}$) arahnya tetap kebawah. Beda sudut phasa antara I dengan I_w sebesar φ .

Kejadian $I_{BC} > I_{BL}$ vektor arus total tetap sebagai referensi, arus cabang I_{BC} arahnya dominan keatas, arus cabang I_{BL} arahnya kebawah **gambar-3.49a**. Selisih arus cabang ($I_{BC} - I_{BL}$) arahnya tetap keatas. Beda sudut phasa antara I dengan I_w sebesar φ .

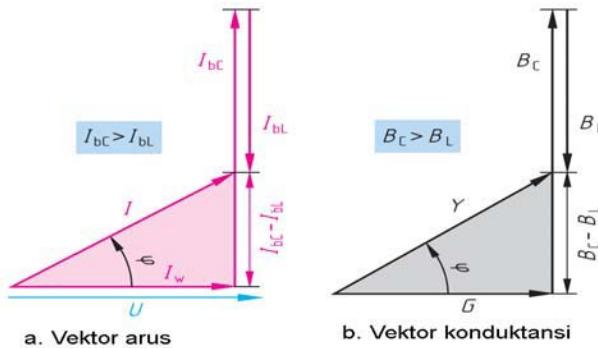
Penjelasan dapat didekati dengan komponen konduktansi G , suseptansi B dan admitansi Y **gambar-3.49b**. Ketika $B_C > B_L$, komponen B_C arah vektornya keatas, komponen B_L arah vektornya kebawah. Selisih kedua vektor ($B_C - B_L$) arahnya keatas. Sudut phasa φ menyatakan pergeseran antara Y dengan G .

Persamaan admitansi Y :

$$\begin{aligned} Y &= G^2 + (B_C + B_L)^2 \Rightarrow \\ Y &= \sqrt{G^2 + (B_C + B_L)^2} \end{aligned}$$

$$Y = \frac{1}{Z} \quad [Y] = \frac{1}{\Omega} = s$$

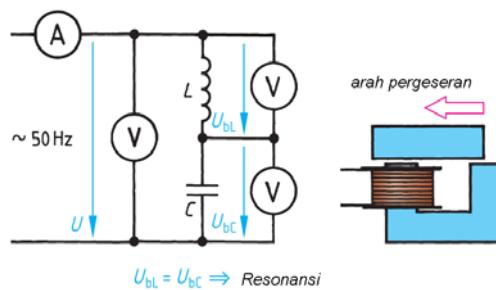
- Y Admitansi (mho, Ω^{-1})
- G Konduktansi (mho, Ω^{-1})
- B_C Suseptansi kapasitif (mho, Ω^{-1})
- B_L Suseptansi induktif (mho, Ω^{-1})
- Z Impedansi (Ω)



Gambar 3.49 : Vektor Arus dan Vektor Konduktansi

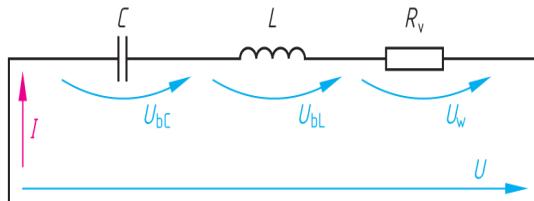
3.7. Resonansi

Resonansi adalah kondisi ketika dua frekuensi yang sama saling bergetar. Sebuah induktor dari 600 gulungan kawat pada inti U-I, dirangkaiakan dengan Kapasitor $8.2\mu F$. Dihubungkan dengan sumber tegangan AC tegangan 25 V frekuensi 50 Hz **gambar-3.50**. Dengan menggeserkan inti besi I kekiri-kanan, terjadi perubahan penunjukan arus A, tegangan U_{BL} dan U_{BC} . Ketika tegangan $U_{BL} = U_{BC}$, terjadi penunjukan arus maksimum, saat itulah terjadi resonansi.



Gambar 3.50 :Rangkaian Resonansi LC

Rangkaian seri Resistor R, Kapasitor L dan Kapasitor C **gambar-3.51**, akan terjadi tiga kemungkinan. Pertama ketika reaktansi $X_L < X_C$, yang terjadi tegangan $U_{BC} > U_{BL}$. Kedua ketika reaktansi $X_L = X_C$, tegangan $U_{BC} = U_{BL}$, penunjukan ampermeter maksimum. Ketiga ketika kondisi $X_L > X_C$, tegangan $U_{BL} > U_{BC}$, kondisi sama kejadian pertama **gambar-3.52**.



Gambar 3.51 :Rangkaian Resonansi LC

Persamaan kondisi resonansi :

$$X_L = X_C \Rightarrow \omega_r \cdot L = \frac{1}{\omega_r \cdot C} \Rightarrow$$

$$\omega_r^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow \quad \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\Rightarrow 2\pi \cdot f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow \quad f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}$$

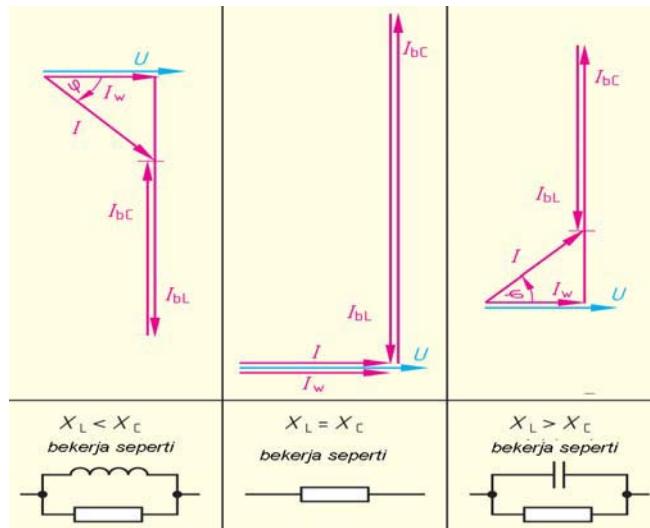
$$f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}$$

$$[f_r] = \frac{1}{\sqrt{\frac{Vs.As}{A.V}}} = \frac{1}{s} = Hz$$

Fr Frekuensi resonansi (Hz)

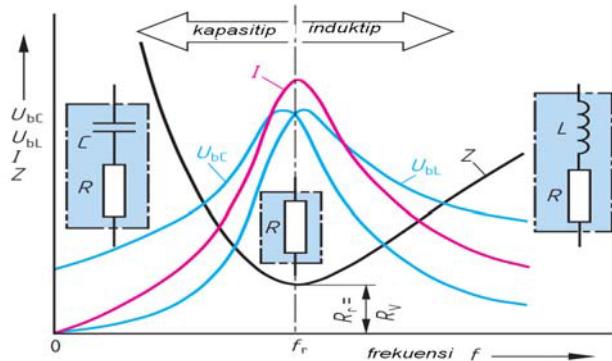
L Induktor (Henry)

C Kapasitor (Farad)



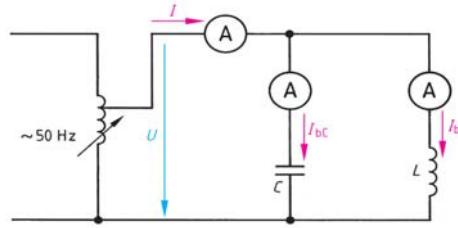
Gambar 3.52 : Vektor Diagram Arus

Rangkaian resonansi Resistor seri induktor dan Kapasitor terjadi tiga kondisi **gambar-3.53**. Pertama kondisi dimana reaktansi $X_C > X_L$, drop tegangan $U_{BC} > U_{BL}$, rangkaian lebih kapasitif. Kedua ketika reaktansi $X_L = X_C$, keduanya saling meniadakan, besarnya arus maksimum, beban hanya Resistor saja. Ketiga ketika reaktansi $X_L > X_C$, drop tegangan $U_{BL} > U_{BC}$, rangkaian lebih induktif. Grafik arus berbentuk puncak saat terjadi frekuensi resonansi di titik f_r . Impedansi berbentuk lengkung kebawah, harga minimum terjadi dititik frekuensi resonansi f_r .



Gambar 3.53 : Diagram Arus Saat Resonansi

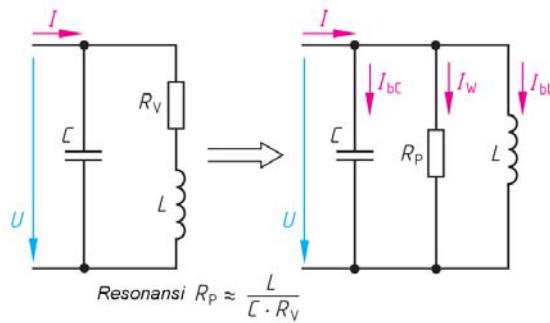
Kapasitor $C=8,2\mu F$ diparalel dengan induktor L terdiri 600 gulungan kawat dengan inti U-I. Dihubungkan sumber tegangan autotrafo 25 V frekuensi 50 Hz **gambar 3.54**.



Gambar 3.54 : Rangkaian Resonansi C, L

Rangkaian praktik dapat disederhanakan menjadi rangkaian Kapasitor C paralel Resistor Rp dan induktor L **gambar-3.55**. Arus cabang I_{BC} ke Kapasitor, I_W ke Resistor dan I_{BL} ke induktor.

Resonasi terjadi pada frekuensi tertentu dimana reaktansi $X_L = X_C$. Saat itu arus $I_{BL} = I_{BC}$, arus total I sama dengan I_W **gambar-3.55**



Gambar 3.54 : Penyederhanaan rangkaian

Persamaan frekuensi resonansi :

$$X_L = X_C \Rightarrow \omega_r \cdot L = \frac{1}{\omega_r \cdot C} \Rightarrow$$

$$\omega_r^2 = \frac{1}{L \cdot C} \Rightarrow \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

$$\Rightarrow 2\pi \cdot f_r = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \Rightarrow$$

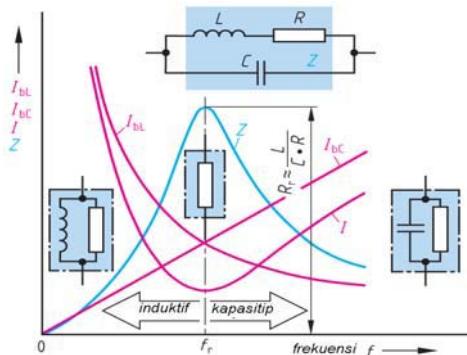
$$f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

f_r Frekuensi resonansi (Hz)

L Induktor (Henry)

C Kapasitor (Farad)

Rangkaian resonansi paralel Resistor, induktor dan Kapasitor terjadi tiga kondisi **gambar-3.56**. Pertama kondisi dimana reaktansi $X_C > X_L$, arus cabang $I_{BL} > I_{BC}$, rangkaian lebih induktif. Kedua ketika reaktansi $X_L = X_C$, arus cabang $I_{BL} = I_{BC}$ saling meniadakan, besarnya arus maksimum, beban hanya Resistor saja. Ketiga ketika reaktansi $X_L > X_C$, arus cabang $I_{BC} > I_{BL}$, rangkaian lebih kapasitif. Grafik impedansi Z berbentuk puncak saat terjadi frekuensi resonansi di titik f_r . Arus total I berbentuk lengkung kebawah, harga minimum terjadi dititik frekuensi resonansi f_r .



Gambar 3.55 : Diagram Arus Resonansi

Contoh: Induktor $L = 1\text{H}$ dirangkai paralel dengan Kapasitor $C = 22\text{nF}$. Hitunglah a) besarnya frekuensi resonansi. b). jika frekuensi ditetapkan 50 Hz, induktor $L = 1\text{H}$, hitung besarnya nilai Kapasitor agar terjadi kondisi resonansi ?

Jawaban :

$$\text{a). } f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1\text{H}.22\text{nF}}} = \\ = \frac{1}{2\pi\sqrt{1\Omega\text{s}.22.10^{-9}\text{s}/\Omega}} = 1.037\text{ Hz}$$

$$\text{b). } \omega_r^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow C = \frac{1}{\omega_r^2 \cdot L} = \frac{1}{(2\pi \cdot f)^2 \cdot L} \\ = \frac{1}{(2\pi \cdot 50 \text{ Hz})^2 \cdot 1\Omega\text{s}} = 10,1\text{ }\mu\text{F}$$

3.8. Sistem Listrik Tiga Fasa

3.8.1. Generator Listrik Tiga Phasa

Prinsip dasar pembangkitan listrik berdasarkan *hukum tangan kanan Fleming*. Penghantar berada ditelapak tangan kanan yang membuka, ditembus oleh medan magnet Φ dari kutub magnet utara-selatan, kawat digerakkan kearah ibu jari, maka akan timbul arus listrik yang searah dengan keempat jari **gambar-3.57**

Secara praktis sebatang kawat dikedua ujung digantung dengan kawat fleksibel, ditempatkan diantara kutub magnet utara-selatan **gambar-3.58**. Kawat dianyunkan searah anak panah, keluar masuk, sehingga batang kawat dipotong oleh fluk magnet Φ . Diujung penghantar dipasang pengukur tegangan listrik, jarum voltmeter akan menunjuk kan ke kanan dan kekiri. Prinsip ini dasar pembangkitan listrik AC.

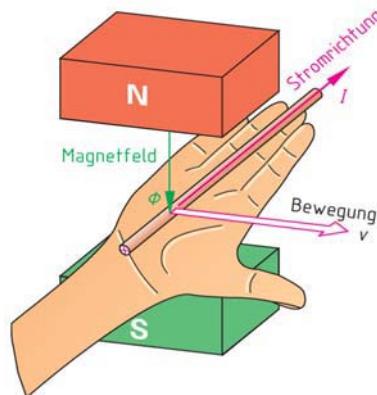
Besarnya tegangan induksi :

$$ui = B \cdot l \cdot v \cdot Z \quad (\text{Volt})$$

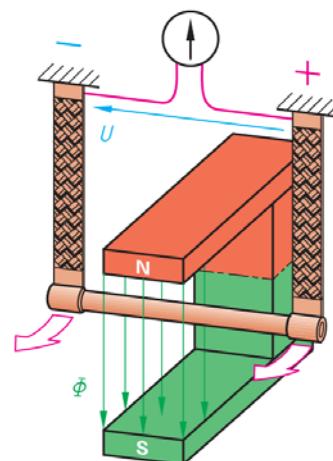
- ui Tegangan induksi (V)
- B Fluk magnet
- l Panjang penghantar (m)
- v Kecepatan (m/det)
- Z Jumlah penghantar

Generator adalah alat yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Konstruksi generator tiga phasa **gambar-3.59** terdiri stator dan rotor. Stator adalah bagian generator yang diam, diantaranya badan generator, belitan stator, sikat arang, terminal box.

Rotor merupakan bagian generator yang bergerak, terdiri kutub rotor, sliring. Belitan stator terdiri dari tiga phasa, belitan phasa U, belitan phasa V dan phasa W. Ujung-ujung belitan diberikan notasi U1-U2, V1-V2 dan W1-W2.



Gambar 3.57 : Prinsip Tangan Kanan Fleming

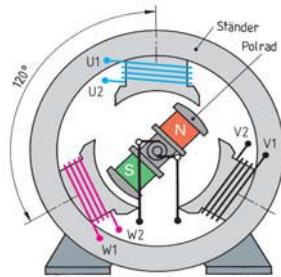


Gambar 3.58 : Pembangkitan Tegangan Induksi

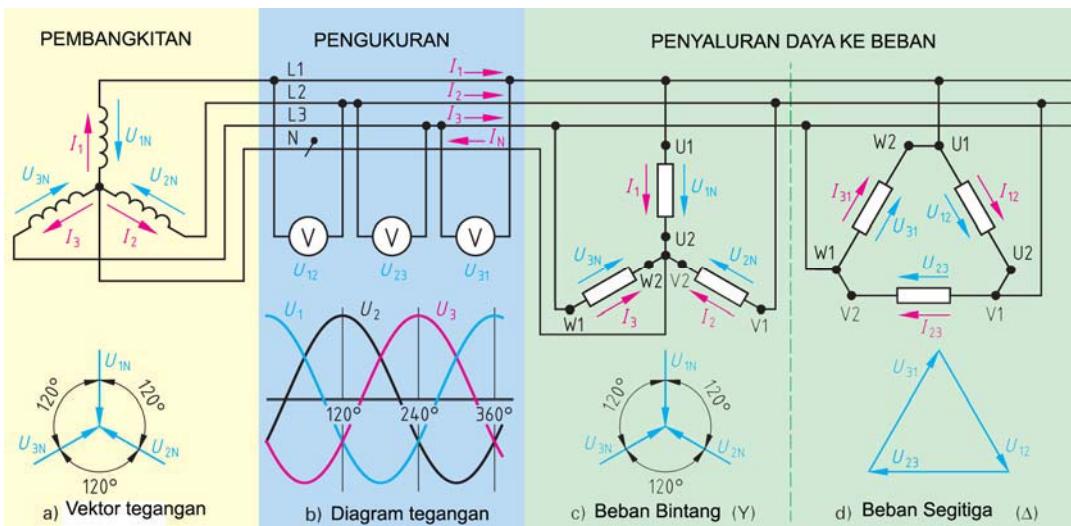
Dasar Listrik Arus Bolak Balik

Rotor memiliki dua kutub utara (N, north) dan kutub selatan (S, south). Arus listrik DC dimasukkan ke belitan rotor melalui slipring dan sikat arang, tujuannya untuk mendapatkan fluk magnet yang bisa diatur besarnya.

Aliran listrik dari pembangkitan, pengukuran tegangan dan penyaluran daya ke beban 3 phasa, dalam hubungan bintang (Y) atau segitiga (Δ) **gambar-3.60**.



Gambar 3.59 : Prinsip Generator 3 Phasa



Gambar 3.60 : Rangkaian pembangkit, pengukuran dan beban bintang-segitiga

Listrik tiga phasa dari pembangkitan, phasa U , V dan W , tegangan ketiga phasa masing-masing berbeda 120° . Phasa U mengalirkan arus I_1 , phasa V mengalirkan arus I_2 dan phasa W mengalirkan arus I_3 . Dengan jala-jala $L1$, $L2$, $L3$ dan N , tegangan diukur dengan tiga buah Voltmeter. Tegangan $L1-L2$ terukur U_{12} , tegangan $L2-L3$ terukur U_{23} dan tegangan $L3-L1$ terukur U_{31} .

Aliran ke beban ada dua jenis, beban bintang (Y) dan beban segitiga (Δ). Beban bintang menggunakan empat kawat $L1-U$, $L2-V$, $L3-W$ dan $N-N$. Belitan beban mendapat arus phasa, juga mendapatkan tegangan phasa-netral.

$$\text{Tegangan phasa-phasa} = U_{12} = \underline{U_{1N}} + \underline{U_{2N}} = \sqrt{3} \cdot U_{1N}$$

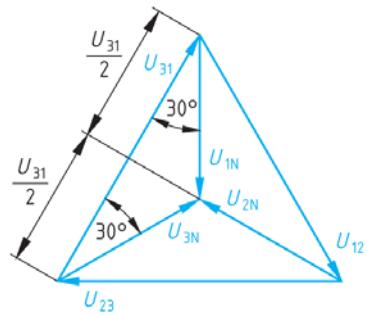
Pada beban segitiga, dipakai tiga pengantar jala-jala ke beban dengan hubungan $L1-U1W2$, $L2-U2V1$ dan $L3-V2W1$. Setiap belitan mendapatkan tegangan phasa-phasa U_{12} , U_{23} , U_{31} , demikian juga arus yang mengalir ke belitan juga arus jala-jala I_{12} , I_{23} dan I_{31} .

$$I_{jala-jala} = I_{12} = I_{23} = I_{31} = \sqrt{3} \cdot I_{1N}$$

3.8.2. Hubungan Bintang

Untuk memahami perbedaan tegangan saat hubungan bintang dan segitiga lihat **gambar-3.61**. Hubungan bintang terdapat tegangan phasa-netral U_{1N} , U_{2N} dan U_{3N} . Juga terdapat tegangan phasa-phasa U_{12} , U_{23} dan U_{31} .

Sedangkan pada hubungan segitiga hanya terdapat tegangan phasa-phasa, yaitu U_{12} , U_{23} dan U_{31} . Analisis secara grafis dapat dijelaskan.



Gambar 3.61 : Tegangan Bintang dan segitiga

$$\frac{U_{31}}{2} = U_{1N} \cdot \cos 30^\circ = U_{1N} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow U_{31} = U_{1N} \cdot \sqrt{3}$$

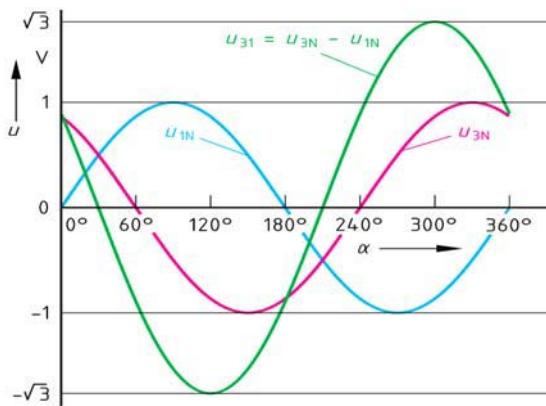
$$U_{31} = U_{3N} - U_{1N}$$

U_{31} Tegangan phasa 3 ke phasa 1

U_{1N} Tegangan phasa 1 ke netral

$\sqrt{3}$ Faktor pengali

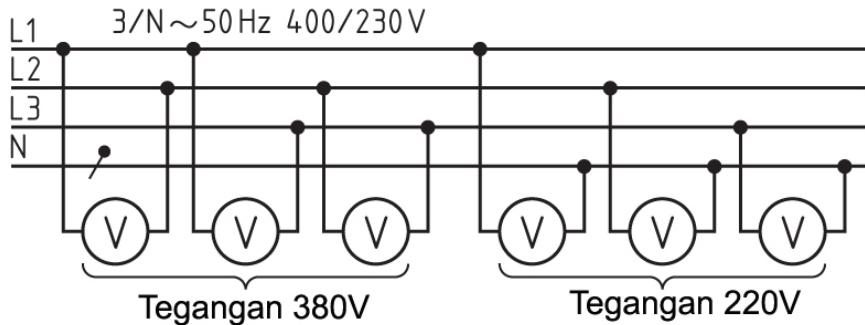
Grafik tegangan phasa-netral dan tegangan phasa-phasa lihat **gambar-3.62**. Tegangan phasa U_{1N} bergerak dari sudut 0° sampai 360° . Tegangan phasa U_{3N} bergerak dari 60° sampai 420° . Tegangan phasa-phasa U_{13} merupakan penjumlahan vektor $(U_{1N}+U_{3N})$ bergerak dari 30° sampai 390° .



Gambar 3.62 : Tegangan phasa netral; tegangan phasa ke phasa

Tegangan phasa-phasa U_{12} , U_{23} , $U_{31}= 380$ V, tegangan phasa netral U_{1N} , U_{2N} , $U_{3N}=220$ V **gambar-3.63**.

$$\frac{380V}{220V} = \sqrt{3} \Rightarrow \frac{U_{31}}{U_{1N}} = \sqrt{3}$$



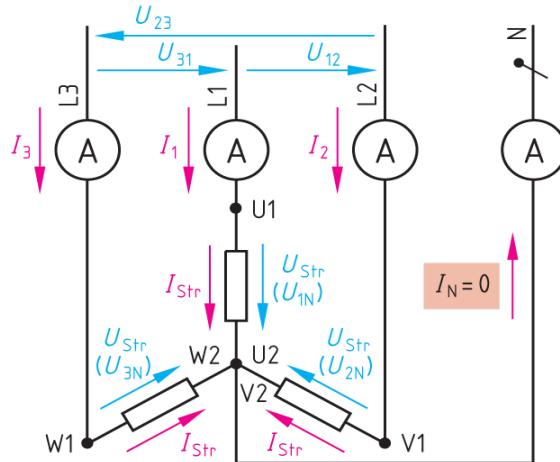
Gambar 3.63 : Pengukur Tegangan phasa-phasa, tegangan phasa-netral

Beban hubungan bintang terminal U_2 , V_2 dan W_2 disatukan. Jala-jala $L1-U1$, $L2-V1$ dan $L3-W1$ **gambar-3.64**. Dipasangkan empat amper meter I_1 , I_2 , I_3 dan I_N . Ketika beban seimbang $I_1 = I_2 = I_3$ ampermeter $I_N = 0$. Tegangan phasa-phasa U_{12} , U_{23} dan U_{31} besarnya 380 V, maka tegangan phasa-netral U_{1N} , U_{2N} dan U_{3N} besarnya :

$$U = \sqrt{3} \cdot U_{str}$$

$$U_{str} = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{380V}{\sqrt{3}} = 220V$$

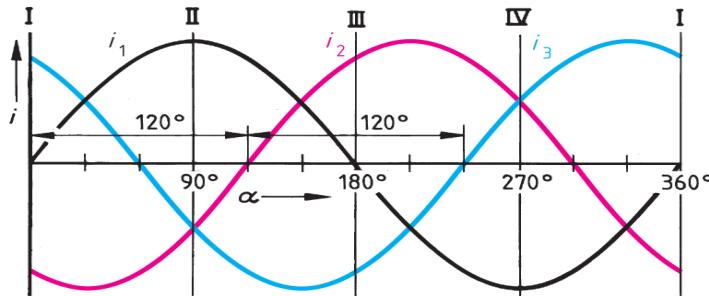
$$I = I_{str}$$



Gambar 3.64 : Beban Bintang

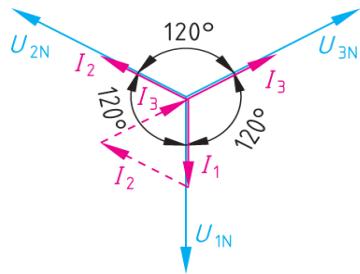
Bentuk gelombang arus listrik tiga phasa lihat **gambar-3.65**. Arus i_1 berawal dari 0° , 180° dan berakhir di sudut α 360° . Arus i_2 berawal dari 120° , 300° dan

berakhir di sudut $\alpha = 480^\circ$. Arus i_3 berawal dari 240° dan berakhir di sudut $\alpha = 600^\circ$. Antara i_1 , i_2 , i_3 masing-masing berbeda 120° .



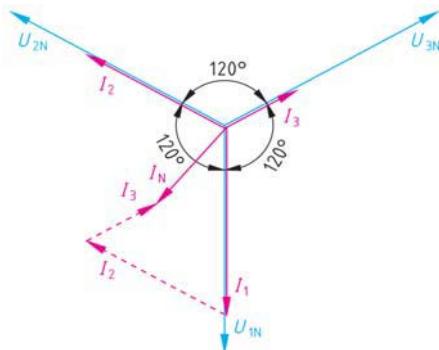
Gambar 3.65 : Gelombang Sinusoida 3 phasa

Rangkaian **gambar-3.66**, dipasangkan tiga beban Resistor yang besarnya identik sama, terhubung secara bintang. Vektor tegangan U_{1N} , U_{2N} dan U_{3N} masing-masing berbeda sudut 120° **gambar-3.66**. Besarnya arus I_1 , I_2 dan I_3 akan sama besarnya. Vektor arus I_1 akan sephasa dengan U_{1N} , vektor I_2 akan sephasa dengan U_{2N} dan I_3 sephasa dengan U_{3N} . Kondisi ini sering disebut *beban seimbang*.



Gambar 3.66 : Diagram Vektor Tegangan dan Arus 3 phasa

Tiga beban Resistor besarnya tidak sama dirangkai secara bintang **gambar-3.67**. Penunjukan ampermeter $I_1=2,5\text{ A}$ $I_2 = 2,0\text{ A}$ $I_3 = 1,0\text{ A}$. Hitunglah besarnya I_N



Gambar 3.67 :Vektor Tegangan dan Arus beban Resistif tidak seimbang

Dengan bantuan **gambar-3.67** dibuat skala 1cm= 1 A.

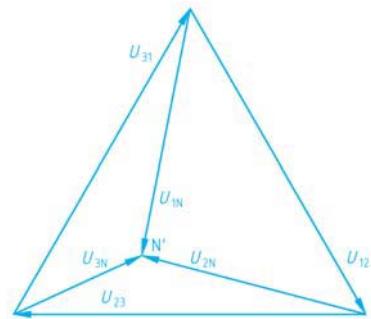
$$I_1 = 2,5 \text{ A} = 2,5 \text{ cm}$$

$$I_2 = 2,0 \text{ A} = 2,0 \text{ cm}$$

$$I_3 = 1,0 \text{ A} = 1,0 \text{ cm}$$

Ukur panjang $I_N = 1,2 \text{ cm} = 1,2 \text{ A}$.

Beban tidak seimbang mengakibatkan ada arus yang mengalir melalui kawat netral, sebesar $I_N = 1,2 \text{ A}$. Akibat lainnya tegangan phasa-netral U_{1N} , U_{2N} dan U_{3N} juga berubah **gambar-3.68**, posisi titik netral N bergeser dari kedudukan awal ditengah, bergeser kearah kiri bawah N'. Meskipun demikian tegangan phasa-phasa U_{12} , U_{23} dan U_{31} tetap simetris. Oleh sebab itu pada hubungan bintang sedapat mungkin beban tiap phasa dibuat seimbang, sehingga tidak mengganggu tegangan phasa-netral.



Gambar 3.68 : Vektor Tegangan phasa-netral, beban tidak seimbang

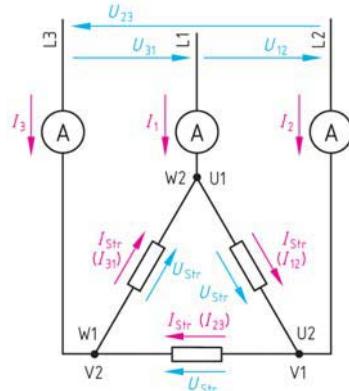
3.8.3. Hubungan Segitiga (Δ)

Hubungan segitiga ujung-ujung beban dihubungkan saling menyilang satu dengan lainnya **gambar-3.69**. Terminal U_1 dan W_2 disatukan di catu dari phasa L_1 , U_2 dan V_1 disatukan dicatu dari phasa L_2 , V_2 dan W_1 disatukan dicatu dari phasa L_3 . Tiga amper meter mengukur arus I_1 , I_2 dan I_3 .

$$I_1 = I_{12} - I_{31}$$

$$I_2 = I_{23} - I_{12}$$

$$I_3 = I_{31} - I_{23}$$



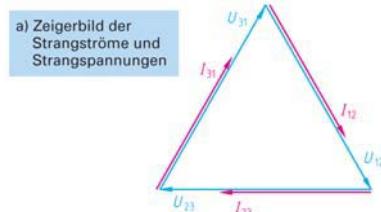
Gambar 3.69 : Hubungan Segitiga

Hubungan segitiga tidak ada tegangan phasa-netral, yang ada hanya tegangan phasa-phasa.

$$I = \sqrt{3} \cdot I_{str}$$

$$U = U_{str}$$

Arus belitan phasa hubungan segitiga terukur 2,5A. Hitunglah besarnya arus jala-jala.

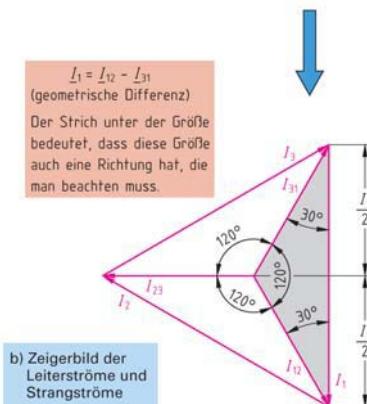


Gambar 3.70 : Vektor Arus Segitiga

Jawaban :

$$I = \sqrt{3} \cdot 2,5 = 4,3 \text{ A}$$

Secara grafis dibuat skala $10\text{mm} = 1 \text{ A}$, dengan **gambar-3.71** diukur I_1 , I_2 dan I_3 panjangnya = $43 \text{ mm} = 4,3 \text{ A}$.



Gambar 3.71 : Vektor Arus phasa dengan arus jala-jala

3.8.4. Hubungan Bintang-Segitiga Terminal Motor Induksi

Terminal box motor induksi tiga phasa memiliki notasi standar. Urutan ujung belitan phasa W2, U2 dan V2 ujung belitan lainnya diberikan notasi U1, V1 dan W1.

Hubungan Bintang, terminal W2, U2 dan V2 di kopel menjadi satu sebagai titik bintang **gambar-3.72**. Terminal U1 terhubung ke L1, terminal V1 terhubung ke L2 dan terminal W1 terhubung ke jala-jala L3. Yang harus diperhatikan belitan motor harus mampu menanggung tegangan phasa-netral.

$$I_{str} = 1 \quad U_{str} = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

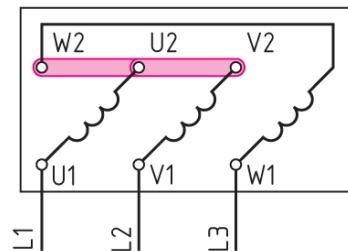
$$S = \sqrt{3} \times U_{str} \times I_{str} = 3 \times I \times \frac{U}{\sqrt{3}}$$

$$S = \sqrt{3} \times U \times I$$

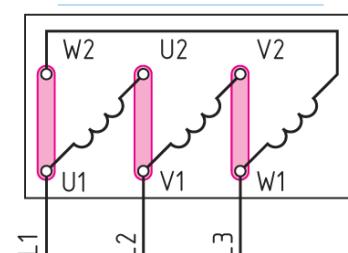
$$P = S \times \cos \varphi$$

$$Q = S \times \sin \varphi$$

Hubungan Segitiga, **gambar-3.73** terminal W2 dikopel U1 langsung ke jala-jala L1. Terminal U2 di kopel terminal V1 langsung terhubung jala-jala L2. Terminal V2 dikopel terminal W1 terhubung ke jala-jala L3. Belitan motor harus dilihat harus mampu menahan tegangan jala-jala.



Gambar 3.72 : Terminal Motor Hubung Singkat



Gambar 3.73 : Terminal Motor Hubung Singkat

$$U_{str} = U \quad I_{str} = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

$$S = \sqrt{3} \times I_{str} \times U_{str} = 3 \times U \times \frac{I}{\sqrt{3}}$$

$$S = \sqrt{3} \times U \times I$$

$$P = S \times \cos \varphi \quad Q = S \times \sin \varphi$$

Contoh: Motor induksi 3 phasa data nameplate tegangan 400 V, $\cos \alpha = 0,83$, arus jala-jala 8,7 A. Hitung besarnya daya aktif P, daya semu S dan daya reaktif Q ?

Jawaban :

a). $P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi = \sqrt{3} \times 400V \times 8,7A \times 0,83 = 5 \text{ kW}$

b). $S = \sqrt{3} \times U \times I = \sqrt{3} \times 400V \times 8,7A = 6,03 \text{ kVA}$

c).

$$Q_L = \sqrt{3} \times U \times I \times \sin \varphi = \sqrt{3} \times 400V \times 8,7A \times 0,56 =$$

3,38 kvar

Tiga buah Resistor dijadikan beban tiga phasa, pertama dihubungkan secara bintang **gambar 3.74a**, terukur arus $I_1 = I_2 = I_3$ sebesar 2,3 A. Kemudian dihubungkan secara segitiga **gambar 3.74b**, terukur arus $I_1 = I_2 = I_3$ sebesar 6,9 A. Hitung besarnya a) daya aktif P saat hubungan bintang, b) daya aktif P saat hubungan segitiga c) Perbandingan daya segitiga/bintang ?

Jawaban :

a) Hubungan Bintang, $I = 2,3 \text{ A}$

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$$

$$P = \sqrt{3} \times 400V \times 2,3A \times 1 = 1,6 \text{ kW}$$

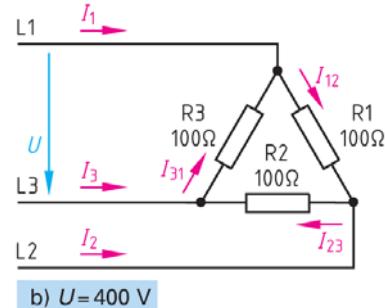
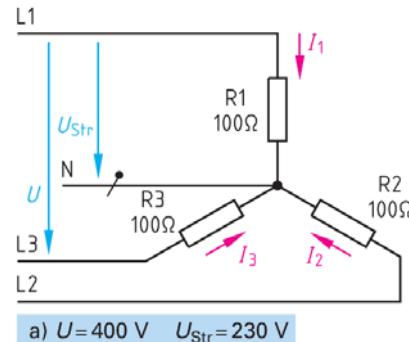
b) Hubungan Segitiga, $I = 6,9 \text{ A}$

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$$

$$P = \sqrt{3} \times 400V \times 6,9A \times 1 = 4,8 \text{ kW}$$

c) Perbandingan P segitiga / P bintang

$$\frac{P_V}{P_B} = \frac{4,8 \text{ kW}}{1,6 \text{ kW}} = 3$$



Gambar 3.74 : Beban Bintang dan Segitiga

Persamaan menghitung daya aktif, semu dan reaktif listrik tiga phasa :

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

$$[S] = V \cdot A = VA$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$[P] = W$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

$$[Q] = VAR$$

Tabel 3.5 Tabel Nameplate Motor Induksi

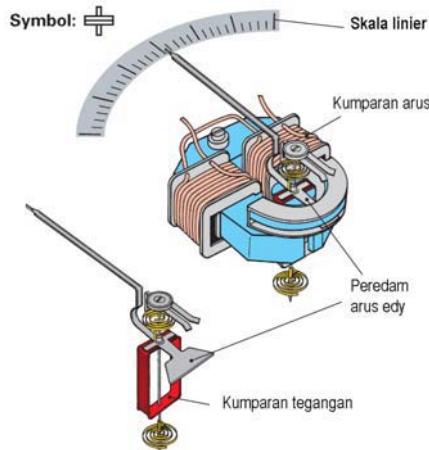
Tegangan Jala-jala		690 V	400 V	230 V	500 V
Tegangan belitan motor	400 V	Y	Δ	-	-
	230 V	-	Y	Δ	-
	500 V	-	-	-	Δ
	289 V	-	-	-	Y

3.9. Pengukuran Daya Listrik Tiga Phasa

Pengukuran daya disebut *Wattmeter*, prinsip kerjanya berdasarkan elektrodinamik **gambar-3.75**. Memiliki dua belitan, yaitu belitan tegangan dan belitan arus. Terdiri dua bagian, yaitu magnet diam dengan belitan tegangan, dan bagian yang bergerak merupakan koil arus menggerakkan jarum penunjuk. Interaksi dua fluk magnet tegangan dan fluk magnet arus menghasilkan torsi menggerakkan jarum. Simpangan jarum sebanding dengan daya $P = U \cdot I \cdot \cos \alpha$.

Pengukuran daya listrik tiga phasa dengan wattmeter dapat dilakukan dengan wattmeter satu phasa **gambar-3.76**. Wattmeter ini memiliki dua belitan, yaitu belitan tegangan terminal 2-5, dan belitan arus terminal 1-3. Terminal 5 dihubungkan ke kawat netral. Jala-jala L_1 , L_2 , L_3 dan N dihubungkan dengan sumber tegangan (PLN), ujung lainnya terhubung ke beban tiga phasa.

Hasil ukur = 3 x penunjukan wattmeter.



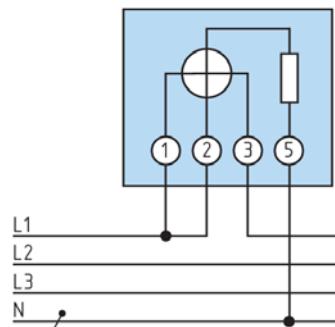
Gambar 3.75 : Prinsip Wattmeter

Untuk daya yang sangat besar, arus beban mencapai puluhan sampai ratusan amper, dipakai alat bantu berupa trafo arus CT. Rating trafo arus CT tersedia dalam berbagai ukuran, misalnya 100/5 artinya mampu sampai arus beban primer 100 A dan arus sekunder ke wattmeter 5 A. Trafo arus CT, bagian primer satu belitan saja, yaitu kabel jala-jala yang dimasukkan ke lubang tengahnya, bagian sekunder terdapat terminal *L* – *K*.

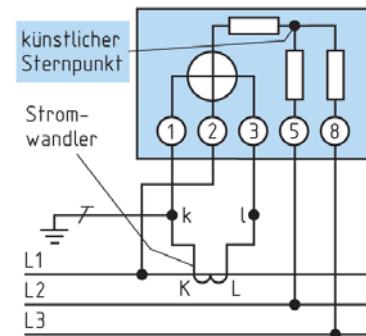
Pengawatan trafo arus CT dengan wattmeter lihat **gambar-3.77**. B. Bagian primer CT sisi *K* berhadapan dengan sumber tegangan *L*1, sisi *L* berhadapan dengan bagian beban, tidak boleh terbalik. Sekunder CT dihubungkan ke belitan arus wattmeter, terminal *k* ke kaki 1 sekaligus sambungkan dengan grounding, dan terminal *l* disambungkan kaki 3. Belitan tegangan kaki 2 dihubungkan *L*1 dan kaki 5 ke *L*2 dan kaki 8 terhubung ke *L*3.

Hasil ukur = 3 x penunjukan wattmeter.

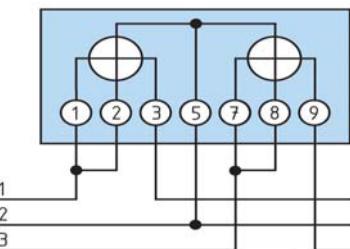
Pengukuran wattmeter tiga phasa dapat digunakan dengan rangkaian **gambar-3.78**. Terdapat dua belitan arus, yaitu kaki 1-3 dan kaki 7-9. Belitan tegangan juga ada dua buah, yaitu kaki 2-5 dan kaki 5-8. Kawat *L*1, *L*2 dan *L*3 dihubungkan ke sumber tegangan PLN. Kawat *L*1 masuk ke belitan arus-1 lewat kaki 1 dan 3, sekaligus kaki 2 dikopel ke kaki 3 menuju ke belitan tegangan, kaki 5 ke jala-jala *L*2. Jala-jala *L*3 kaki 7 masuk belitan arus ke kaki 9 selanjutnya terhubung ke beban.



Gambar 3.76 : Pengukuran Daya dengan satu wattmeter



Gambar 3.77 : Pengukuran Daya dengan Trafo Arus (CT)



Gambar 3.78 : Pengukuran Daya dengan dua wattmeter

3.10. Kompensasi Daya

3.10.1. Kompensasi Daya Reaktif

Lampu TL 40 Watt, tegangan 220 memiliki faktor kerja $\cos \alpha$ 0,5 – 0,6. Hal ini akan menyebabkan daya reaktif menjadi besar. Untuk memperbaiki faktor kerja $\cos \alpha$ 0,9 dipasangkan Kapasitor sekitar $7\mu F/250 V$ **gambar-3.79**. Faktor kerja yang rendah merugikan disamping menyebabkan arus jala-jala akan lebih besar, juga kualitas listrik menjadi rendah. Beban yang sifatnya induktif, yang mengandung belitan kawat seperti motor listrik, mesin las faktor kerjanya berkisar 0,6 sampai 0,7.

Kondisi sebelum kompensasi, daya aktif P sebagai referensi, daya induktif sebelum kompensasi Q_L , daya semu sebelum kompensasi S_1 , faktor kerja sebelum kompensasi φ_1 **gambar-3.80**.

Kondisi setelah kompensasi, daya aktif P sebagai referensi tetap sama, daya induktif setelah kompensasi oleh Kapasitor ($Q_L - Q_C$), daya semu setelah kompensasi S_2 , faktor kerja setelah kompensasi φ_2 .

Persamaan daya reaktif kompensasi:

$$Q_C = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

$$\tan \varphi_1 = \frac{Q_L}{P} \quad \tan \varphi_2 = \frac{Q_L - Q_C}{P}$$

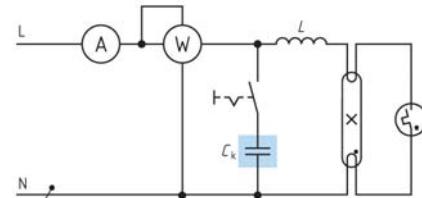
P Daya aktif (W)

Q_L Daya induktif (VAR)

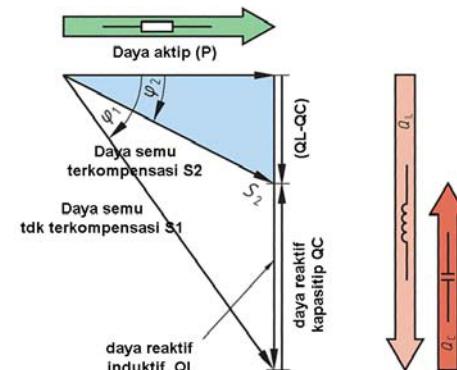
Q_C Daya kapasitif (VAR)

φ_1 Sudut phasa sebelum kompensasi

φ_2 Sudut phasa setelah kompensasi



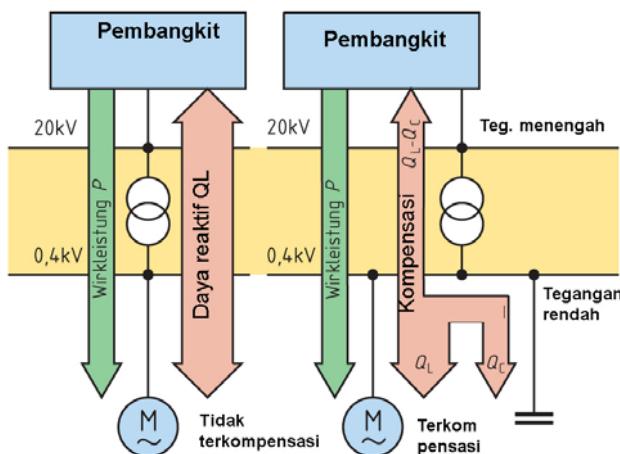
Gambar 3.79 : Lampu TL dengan kompensasi kapasitor



Gambar 3.80 : Segitiga Daya Kompensasi

Sistem daya listrik yang besar belum dilakukan kompensasi, pengaruh daya induktif Q_L dari beban motor induksi dirasakan oleh sistem tegangan 20 KV **gambar-3.81a**.

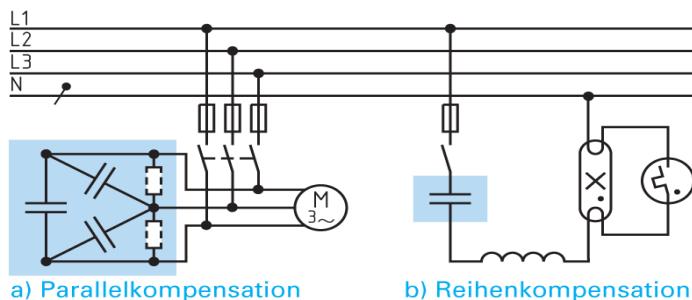
Pelaksanaan kompensasi daya reaktif sistem kelistrikan **gambar-3.81b**, dengan pemasangan Kapasitor disisi tegangan rendah 400 V, sehingga rugi-rugi daya reaktif tidak ada dalam sistem tegangan 20 KV.



Gambar 3.81 : Aliran Daya Reaktif Sebelum dan Sesudah Kompensasi

3.10.2. Sistem Kompensasi Daya 3 Phasa

Pemasangan Kapasitor sebagai kompensasi daya reaktif dilakukan dengan dua cara **gambar-3.82**. Pertama untuk beban daya besar seperti motor induksi Kapasitor dipasang secara paralel dengan beban. Cara kedua Kapasitor dipasang seri untuk daya kecil dibawah ratusan watt, misalnya lampu TL.

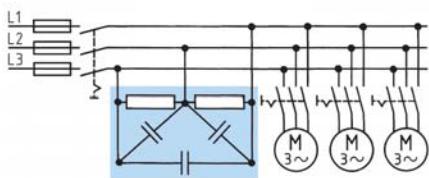


Gambar 3.82 : Rangkaian Kompensasi Paralel dan Kompensasi Seri

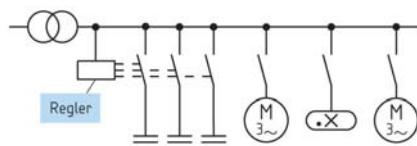
Pemasangan untuk beban besar dengan beban faktor kerja rendah, misalnya motor induksi, air condition yang banyak dipakai di pertokoan, hotel-hotel, perkantoran. Instalasi Kapasitor dilakukan dengan dua cara.

Pertama dengan pengaturan secara sentral pada panel daya diruang transformator atau genset **gambar-3.81**. Kedua instalasi Kapasitor dilakukan secara kelompok beban, misalkan tiap 3 buah motor induksi dilayani satu

kelompok Kapasitor. Kelompok beban air condition dilayani oleh Kapasitor lainnya **gambar-3.82**.



*Gambar 3.83 :
Kompensasi Grup*



*Gambar 3.84 :
Kompensasi Sentral*

Contoh: Sebuah lampu TL =58 W dan sebuah lampu pijar 12 W dipasang pada tegangan 220 V, frekuensi 50 Hz, faktor kerja sebelum kompensasi $\cos \varphi_1 = 0,48$. akan dipasang Kapasitor agar faktor kerja baru $\cos \varphi_2 = 0,9$ **gambar-3.83**. Hitung a) daya reaktif sebelum dan setelah kompensasi b) hitung besar arus sebelum dan setelah kompensasi c) besar rating Kapasitor

Jawaban :

a). $Q_c = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$;

$$\cos \varphi_1 = 0,48 \Rightarrow \varphi_1 = 61,3^\circ \Rightarrow \tan \varphi_1 = 1,82$$

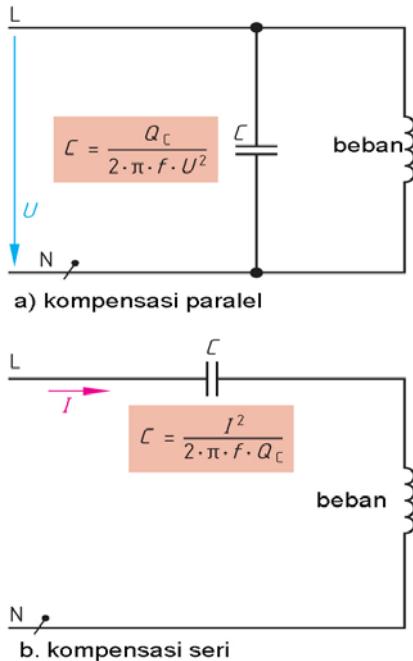
$$\cos \varphi_2 = 0,90 \Rightarrow \varphi_2 = 25,8^\circ \Rightarrow \tan \varphi_2 = 0,48$$

$$Q = (58 \text{ W} + 12 \text{ W}) \times (1,82 - 0,48) = 93,8 \text{ VAR}$$

b). $I_1 = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi_1} = \frac{70 \text{ W}}{230 \text{ V} \cdot 0,48} = 0,63 \text{ A}$

$$I_2 = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi_2} = \frac{70 \text{ W}}{230 \text{ V} \cdot 0,9} = 0,34 \text{ A}$$

c). $\frac{Q_c}{2\pi f U^2} = \frac{93,8 \text{ var}}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 230^2 \text{ V}^2} = 5,65 \mu\text{F}$



Gambar 3.85 : Kompensasi Parelel & Kompensasi Seri Beban Satu Phasa

3.11.Rangkuman

- Listrik AC dihasilkan dari hasil induksi elektromagnetik, sebuah belitan kawat yang berdekatan dengan kutub magnet permanen. Kutub permanen diputar pada sumbunya, maka diujung-ujung belitan timbul tegangan listrik bolak-balik.
- Prinsip generator AC sesuai kaidah tangan kiri Flemming, belitan kawat dalam loop tertutup yang dipotong oleh garis gaya magnet, pada ujung belitan kawat akan timbul ggl induksi.
- Satu periode gelombang adalah satu siklus penuh, yaitu satu siklus positif dan satu siklus negatif.
- Bentuk gelombang AC bisa berupa gelombang sinusoida, gelombang kotak, gelombang pulsa dsb.
- *Frekuensi* adalah jumlah periode dalam satu detik. Listrik PLN dengan frekuensi 50 Hz, dalam satu detik terjadi perubahan siklus positif negatif sebanyak 50 kali dalam satu detiknya.

- *Panjang gelombang*, dihitung berdasarkan kecepatan cahaya, 300.000 km/detik.
- Harga rata-rata gelombang sinusoida, yaitu 0,636 harga maksimum
- Harga efektif dari suatu tegangan/ arus bolak balik (AC) adalah sama dengan besarnya tegangan/arus searah (DC) pada suatu tahanan, dimana keduanya menghasilkan panas yang sama.
- Harga efektif gelombang sinusoida besarnya 0,707 dari harga maksimum tegangan/arus.
- Pergeseran phasa terjadi ketika tahanan R dirangkai seri dengan Kapasitor dan dipasang pada sumber tegangan bolak balik.
- Kapasitor menyebabkan pergeseran phasa dimana tegangan drop di Kapasitor mendahului (*leading*) terhadap tegangan sumbernya.
- Induktor menyebabkan pergeseran phasa arus tertinggal (*lagging*) terhadap tegangan sumbernya.
- Kapasitor memiliki sifat melewatkannya arus bolak balik.
- Nilai reaktansi Kapasitor berbanding terbalik dengan kapasitansinya ($X_C = 1/2\pi f C$).
- Makin besar frekuensi nilai reaktansi kapasitif menurun, pada frekuensi rendah nilai reaktansi kapasitif meningkat.
- Reaktansi Induktif (X_L) berbanding lurus dengan frekuensi ($X_L = 2\pi f L$).
- Makin besar frekuensi nilai reaktansi induktif meningkat, pada frekuensi rendah nilai reaktansi induktif akan menurun.
- Drop tegangan induktor mendahului 90° terhadap arus.
- Impedansi (Z) adalah gabungan tahanan R dengan induktor L atau gabungan R dengan Kapasitor C .
- Bilangan kompleks adalah kumpulan titik yang dibentuk oleh bilangan nyata dan bilangan khayal, dalam bidang kompleks $W = a + jb$
- Bilangan nyata dari komponen Resistor, bilangan khayal dari komponen induktor $+j$ dan komponen Kapasitor $-j$.

- Dari bilangan kompleks bisa ditransformasikan ke bilangan polar atau bilangan eksponensial, atau sebaliknya.
- Sudut diperoleh dari $\text{arc } \text{tg } X/R$
- Bilangan polar memiliki besaran dan menyatakan sudut arah
- Bilangan eksponensial memiliki besaran dan eksponensial dengan bilangan pangkat menyatakan arah sudut.
- Rangkaian seri Resistor dan Induktor dengan sumber listrik AC akan terjadi drop tegangan pada masing-masing, dan terjadi pergeseran phasa kedua tegangan sebesar 90° .
- Ada pergeseran sudut phasa antara tegangan dan arus sebesar ϕ .
- Rangkaian paralel Resistor dan induktor dengan sumber tegangan AC menghasilkan cabang arus Resistor I_W sebagai referensi, arus cabang induktor berbeda sudut phasa sebesar 90° terhadap arus I_W , arus total merupakan penjumlahan arus cabang Resistor dan arus cabang induktor.
- Beban impedansi arus bolak balik memiliki tiga jenis daya, yaitu daya semu satuan Volt-amper, daya aktif dengan satuan Watt, dan daya reaktif dengan satuan Volt-amper-reaktif.
- Daya aktif dinyatakan dengan satuan watt, pada beban resistif daya aktif merupakan daya nyata yang diubah menjadi panas.
- Pada beban impedansi daya nyata hasil kali tegangan dan arus dan faktor kerja ($\cos \phi$).
- Pada beban dimana pergeseran phasa tegangan dan arus sebesar 90° , maka daya aktif akan menjadi nol.
- Daya semu dinyatakan dengan satuan Volt-amper, menyatakan kapasitas peralatan listrik. Pada peralatan generator dan transformator kapasitas dinyatakan dengan daya semu atau KVA.
- Segitiga daya menyatakan komponen daya aktif (P), daya reaktif (Q) dan daya semu (S). Resistor seri induktor diberi tegangan AC, berbeda dalam menggambarkan segitiga daya dengan beban Resistor paralel dengan induktor.
- Faktor kerja menggambarkan sudut phasa antara daya aktif dan daya semu. Faktor kerja yang rendah merugikan mengakibatkan arus beban tinggi. Perbaikan faktor kerja menggunakan Kapasitor

- Rangkaian Resistor paralel Kapasitor, memiliki dua cabang arus. Pertama cabang arus Resistor menjadi referensi dan kedua cabang arus Kapasitor *mendahului* tegangan sebesar 90° . Arus total sebagai penjumlahan vektor cabang arus Resistor dan cabang arus Kapasitor.

3.12. Soal-soal

1. Frekuensi Genset diketahui $f = 55$ Hz, hitung besarnya periode.
2. Frekuensi radio Elshinta *FM 89.8 Mhz*, hitung panjang gelombangnya.
3. Gelombang sinusoida bervariasi dari 0 hingga 10 Volt (maksimum). Hitung besarnya tegangan sesaat pada sudut 30° , 45° , 90° , 270° dari satu periode ?
4. Tegangan bolak balik memiliki tegangan maksimum 10 Volt. Hitung besarnya tegangan rata-rata dalam satu periode ?
5. Tegangan bolak balik sebesar 20 V berbentuk gelombang sinusoida, hitung besarnya tegangan maksimum, tegangan maksimum ke maksimum.
6. Kapasitor $0,1 \mu\text{F}$, dihubungkan dengan sumber listrik AC frekuensi 50 Hz. Hitung nilai reaktansi kapasitifnya.
7. Induktor murni sebesar 1 H, dihubungkan dengan sumber tegangan AC $100 \sin 314t$. Tentukan besarnya arus sesaat .
8. Sumber tegangan bolak-balik 10 V, dirangkaikan dengan beban impedansi Z dan menarik arus 50 mA. Hitung besarnya impedansi.
9. Sebuah impedansi dituliskan bilangan komplek $Z = (8 + j6)\Omega$, tuliskan dalam bentuk polar.
10. Dua buah impedansi $Z_1 = (4+j5)\Omega$ dan $Z_2 = (4-j8)$ dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik,. Hitung a) besarnya nilai impedansi masing-masing b) jika keduanya dihubungkan seri hitung impedansi total c) jika keduanya dihubungkan paralel hitung impedansi totalnya.
11. Rangkaian **gambar 3-22** Resistor $R = 10 \text{ k}\Omega$, diberikan tegangan AC 12 V dipasang Ampermeter dan terukur 4,8 mA. Hitung besarnya impedansi Z , besarnya induktor X_L dan drop tegangan pada Resistor U_W dan drop tegangan induktor U_{BL} ?.
12. Beban induktif dihubungkan dengan tegangan AC 220 V, menarik arus 1,0 A dan terukur faktor kerja 0,85. Hitung Daya semu, daya aktif dan daya reaktif.
13. 10 buah lampu pijar dengan tegangan 40W/220V, digabungkan dengan 10 buah lampu TL 18 W/220V. Faktor kerja terukur sebesar $\cos \alpha_1 = 0,5$. Hitunglah daya semu dari beban dan besarnya arus I_1 sebelum kompensasi, Jika diinginkan faktor kerja menjadi $\cos \alpha_2=0,85$ hitung besarnya arus I_2 (setelah kompensasi).
14. Rangkaian seri R , X_L dan X_C terukur tegangan drop $U_w = 15$ V, $U_{BL} = 25$ V, $U_{BC} = 15$ V Hitunglah besarnya tegangan suply U ?

15. Rangkaian seri $R = 100\Omega$, induktor $L = 1H$, dan Kapasitor $C = 10\mu F$, dihubungkan dengan sumber tegangan AC, frekuensi = 50 Hz. Hitung besarnya impedansi Z ?
16. Rangkaian paralel dari reaktansi induktor $X_L = 100 \Omega$, reaktansi Kapasitor $X_C = 120 \Omega$, Resistor $R = 500 \Omega$, dihubungkan dengan sumber tegangan AC 100 V. Hitunglah besarnya arus cabang, dan besar arus total.
17. Induktor $L = 0,1H$ dirangkai paralel dengan Kapasitor $C = 12 \text{ nF}$. Hitunglah a) besarnya frekuensi resonansi. b). jika frekuensi ditetapkan 50 Hz, induktor $L = 0,1H$, hitung besarnya nilai Kapasitor agar terjadi kondisi resonansi ?

BAB 4

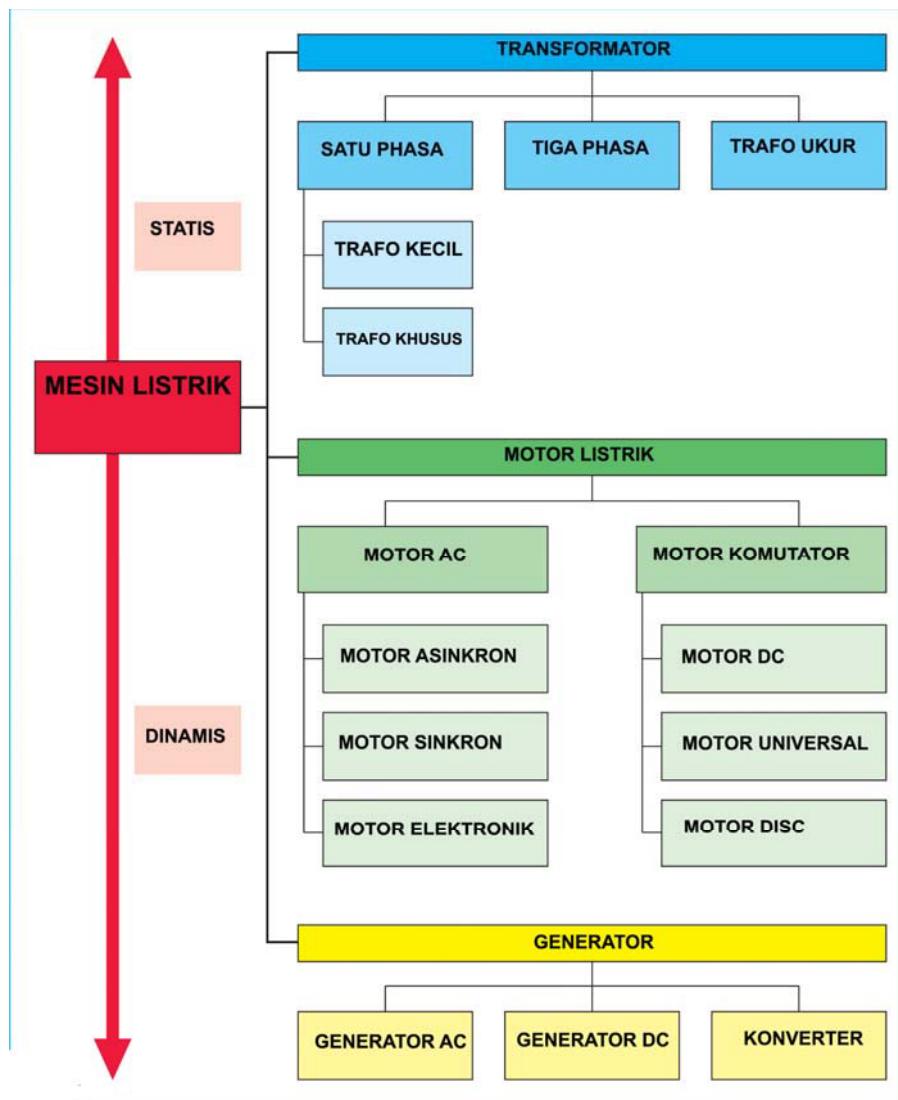
TRANSFORMATOR

Daftar isi :

4.1	Mesin Listrik.....	4-2
4.2	Transformator	4-3
4.3	Prinsip kerja Transformator.....	4-3
4.4	Tranformator Ideal	4-4
4.5	Inti Transformator	4-7
4.6	Rangkaian Listrik Transformator.....	4-9
4.7	Diagram Vektor Tegangan.....	4-9
4.8	Rugi-rugi Transformator.....	4-10
4.9	Efisiensi Transformator.....	4-12
4.10	Akibat Hubung Singkat	4-13
4.11	Autotransformator	4-14
4.12	Transformator khusus.....	4-15
4.13	Transformator Pengukuran	4-16
4.14	Trafo Pengukuran Tegangan	4-16
4.15	Trafo Pengukuran Arus.....	4-17
4.16	Transformator 3 Phasa	4-18
4.17	Inti Transformator 3 Phasa	4-20
4.18	Hubungan belitan Transformator	4-20
4.19	Hubungan Jam Belitan Trafo	4-21
4.20	Minyak Trafo dan Relay Buchholz	4-21
4.21	Konfigurasi Transformator 3 phasa	4-22
4.22	Transformator dalam Jaringan Asimetris	4-23
4.23	Pengelompokan Hubungan Transformator	4-24
4.24	Paralel Dua Transformator.....	4-25
4.25	Rangkuman	4-27
4.26	Soal-soal.....	4-28

4.1. Mesin Listrik

Mesin listrik dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu mesin listrik statis dan mesin listrik dinamis. Mesin listrik statis adalah transformator, alat untuk mentransfer energi listrik dari sisi primer ke sekunder dengan perubahan tegangan pada frekuensi yang sama. Mesin listrik dinamis terdiri atas motor listrik dan generator. Motor listrik merupakan alat untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik putaran. Generator merupakan alat untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Anatomi keseluruhan mesin listrik tampak pada **gambar-4.1** berikut.



Gambar 4.1 : Peta Jenis-jenis Mesin Listrik

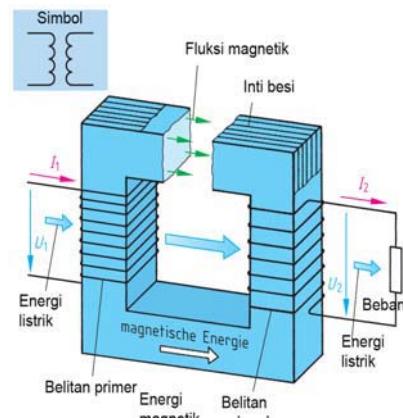
4.2. Transformator

Berikut adalah ilustrasi pentingnya pemakaian transformator dalam sistem distribusi tenaga listrik. Daya listrik sebesar 5.500 KW disalurkan sejauh 100 Km dengan tegangan 220 V, faktor kerja $\cos\varphi = 1$. Besarnya arus yang mengalir sebesar $I = \frac{P}{U \cdot \cos\varphi} = \frac{5.500.000W}{220V.1} = 25.000 \text{ A}$. Jika drop tegangan yang diijinkan sepanjang penghantar 10%, maka penampang penghantar yang digunakan $q = \frac{2 \cdot L \cdot I \cdot \cos\varphi}{x \cdot U_v} = \frac{2.100.000m \cdot 25.000A \cdot 1}{56.22V} = 4.05 \text{ m}^2$

Bisa dibayangkan penampang penghantar 4.05 m^2 sepanjang 100 Km akan sangat merepotkan, harganya akan sangat mahal, tiang penyangga kabel akan sangat besar. Untuk itu jika tegangan listrik dinaikkan menjadi 220kV, maka besarnya arus hanya 25A saja dan penampang kabel penghantar cukup $4,05 \text{ mm}^2$. Ilustrasi diatas pentingnya peranan transformator untuk menyalurkan tenaga listrik dalam sistem distribusi, dengan sistem tegangan tinggi, arus listrik yang dialirkan cukup kecil dan penampang penghantarnya kecil serta ekonomis.

4.3. Prinsip Kerja Transformator

Transformator gambar-4.2 memiliki konstruksi sebuah inti dari tumpukan pelat tipis bahan ferro magnetis yang satu sisi dipasang belitan primer N_1 , dan satu sisi lainnya dipasangkan belitan sekunder N_2 . Belitan primer N_1 dihubungkan ke sumber listrik AC dengan tegangan primer U_1 dan arus primer I_1 . Pada inti trafo timbul garis gaya magnet yang diinduksikan ke belitan sekunder N_2 . Pada belitan sekunder N_2 timbul tegangan sekunder U_2 dan arus sekunder I_2 . Pada trafo ideal berlaku daya primer sama dengan daya sekunder. Energi listrik sekunder disalurkan ke beban listrik.



Gambar 4.2 : Prinsip kerja Transformator Satu Phasa

Besarnya tegangan induksi berlaku persamaan sbb :

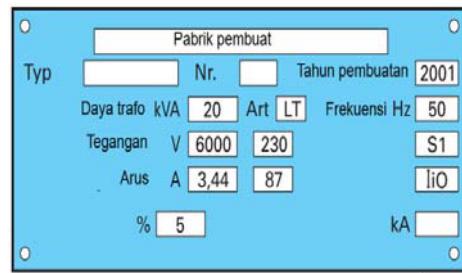
$$U_o = 4,44 B A_f e. f. N$$

- U_o Tegangan induksi
- B Fluk magnet
- A_{fe} Luas inti
- f Frekuensi
- N Jumlah belitan

Transformer

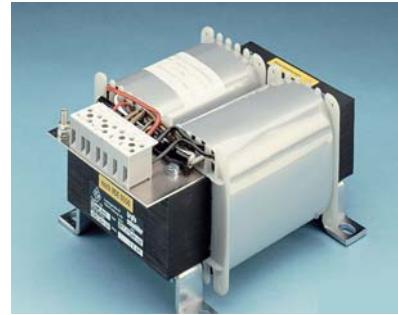
Spesifikasi teknik sebuah transformator dicantumkan dalam *nameplate*, seperti **gambar-4.3** berikut ini :

Daya trafo	20 KVA
Tegangan primer	6.000 V
Arus primer	3,44 A
Frekuensi	50 Hz
Tegangan sekunder	230 V
Arus sekunder	87 A
Impedansi trafo	5%.



Gambar 4.3 : Nameplate Trafo Satu Phasa

Berbagai bentuk inti transformator salah satunya disebut tipe *Core*, seperti **gambar-4.4**. Satu kaki dipasang belitan primer dan kaki lainnya dipasang belitan sekunder. Transformator ideal tidak memiliki rugi-rugi sehingga daya primer sama dengan daya sekunder.



Gambar 4.4 : Trafo satu phasa jenis Core

Transformator :

- a). memindahkan daya listrik dari satu sisi ke sisi lainnya.
- b). tidak ada perubahan frekuensi
- c). bekerja berdasarkan induksi elektromagnetis
- d). dua rangkaian terjadi mutual induksi saling mempengaruhi

4.4. Tranformator Ideal

Transformator ideal adalah trafo yang rugi-ruginya nol, artinya daya pada belitan primer sama dengan daya dibelitan sekunder. Dalam kondisi trafo tanpa beban, hubungan antara tegangan primer dan sekunder dengan jumlah belitan primer dan sekunder berlaku persamaan :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Perbandingan tegangan disebut perbandingan transformasi dituliskan dengan simbol \dot{U} ,

$$\ddot{U} = \frac{sisi - tegangan - tinggi}{sisi - tegangan - rendah} = \frac{U_1}{U_2}$$

Perbandingan transformasi (\ddot{U}) juga berlaku pada perbandingan belitan primer dan sekunder $\ddot{U} = \frac{N_1}{N_2}$

Hubungan antara tegangan dan jumlah belitan, secara teoritis mengikuti hukum induksi yang besarnya jumlah belitan N dan $\Delta\Phi/\Delta t$. Besarnya tegangan induksi :

$$U_{induksi} = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Mengingat pada trafo memiliki dua belitan, yaitu belitan primer N_1 dan belitan sekunder N_2 , maka tegangan primer dan sekunder dapat diketahui :

$$U_1 = N_1 \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{dan} \quad U_2 = N_2 \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{U_1}{N_1} \quad \text{dan} \quad \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{U_2}{N_2}$$

Mengingat $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, sisi kiri sama dengan sisi kanan maka persamaan umum hubungan antara tegangan dan jumlah belitan pada trafo ideal adalah :

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2} \quad \text{atau} \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Perbandingan transformasi antara arus dengan jumlah belitan transformator dapat diuraikan dengan persamaan :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Dengan demikian perbandingan transformasi untuk arus berlaku $\ddot{U} = \frac{I_2}{I_1}$

Perbandingan transformasi untuk impedansi Z , tahanan belitan tembaga R dan induktansi belitan X dapat diturunkan dari tegangan dan arus, dan berlaku persamaan :

$$\ddot{U}^2 = \frac{Z_1}{Z_2} \quad \ddot{U}^2 = \frac{R_1}{R_2} \quad \ddot{U}^2 = \frac{X_1}{X_2}$$

Transformer

Dengan menggunakan perbandingan transformasi diatas, berlaku juga hubungan antara impedansi Z dengan jumlah belitan N sebagai berikut :

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} \quad \text{atau} \quad \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

Kondisi Trafo Ideal jika ditinjau dari arus primer dan sekunder berlaku :

$$S_1 = S_2 \Rightarrow U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

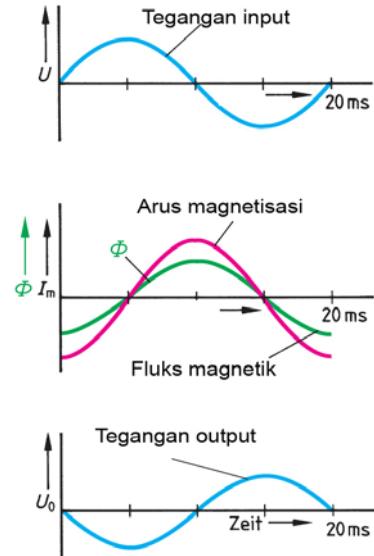
Belitan kawat primer maupun belitan sekunder mengandung komponen resistansi R dan komponen induktansi X_L yang keduanya membentuk impedansi Z. Persamaan impedansi untuk Trafo Ideal berlaku :

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad Z_2 = \frac{U_2}{I_2} \quad \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{I_2}{I_1}$$

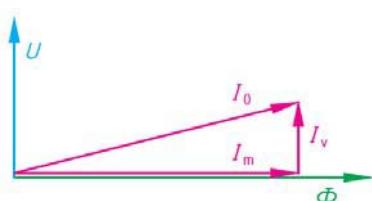
Tegangan primer **gambar-4.5a** berbentuk sinusoida U dengan frekuensi 50 Hz (20 milidetik), siklus positif dengan sudut 0 sampai 180° dan siklus negatif dari 180° sampai 360° .

Arus magnetisasi I_m **gambar-4.5b** terlambat 90° dari tegangan primer, menghasilkan fluk magnet Φ pada inti trafo yang juga berbentuk sinusoida yang bentuknya sama dengan arus magnetisasi.

Induksi magnet yang terjadi pada inti trafo akan diinduksikan ke belitan sekunder. Tegangan sekunder yang dihasilkan **gambar-4.5c** berbeda sudut phasa tegangan primer dengan sekunder sebesar 180° .



Gambar 4.5 : Bentuk Tegangan Input, Arus Magnetisasi dan Tegangan Output Trafo



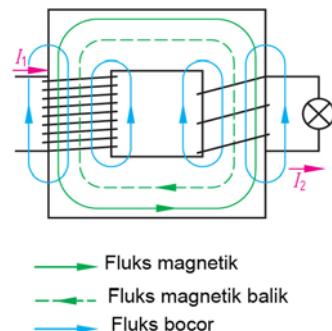
Gambar 4.6 : Vektor Arus Magnetisasi

Pada belitan primer ketika dihubungkan dengan sumber tegangan U, timbul arus tanpa beban I_o . Arus primer I_o terbentuk dari komponen arus magnetisasi I_m yang menghasilkan fluk magnet Φ , dan komponen arus rugi inti I_v . **gambar-4.6**.

$$I_m = I_o \cdot \sin \alpha$$

$$I_v = I_o \cdot \cos \alpha$$

Garis gaya magnet pada inti trafo tampak pada **gambar-4.7**. Belitan primer N_1 yang dihubungkan dengan tegangan AC dialiri arus primer I_1 . Arus primer menghasilkan fluk magnet yang mengalir sepanjang inti besi yang melingkupi juga belitan sekunder N_2 . Ketika belitan sekunder dipasang kan beban, timbul arus sekunder I_2 yang menghasilkan fluk magnet yang berlawanan arah dengan fluk magnet arus primer.

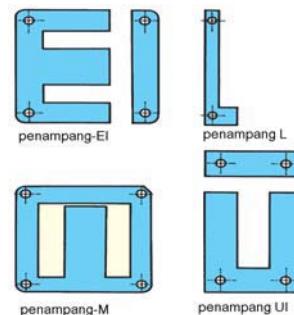


Gambar 4.7 : Belitan primer dan sekunder Trafo Satu Phasa

4.5. Inti Transformer

Komponen transformator yang penting adalah inti trafo. Inti trafo dibuat dari bahan ferro magnetis berupa plat-plat tipis yang ditumpuk menjadi satu sehingga membentuk inti dengan ketebalan tertentu. Ada beberapa jenis inti trafo, diantaranya

- Bentuk EI
- Bentuk L
- Bentuk M
- Bentuk UI



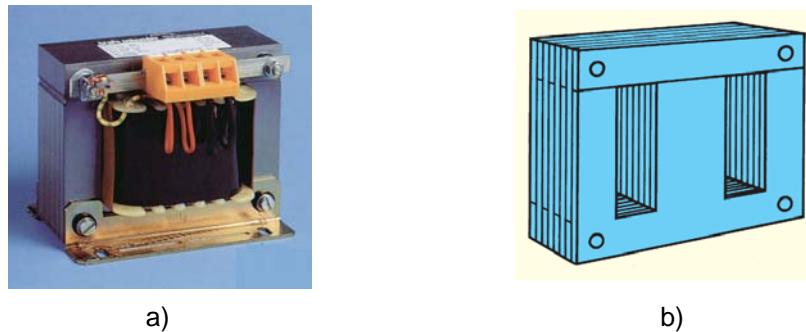
Gambar 4.8 : Bentuk Inti Trafo tipe E-I, L, M dan tipe UI

Inti transformator EI atau tipe Shell **gambar-4.8**. Trafo jenis ini paling banyak dipakai untuk trafo daya kecil puluhan watt sampai daya besar orde kilowatt. Belitan primer dan sekunder digulung pada inti bagian tengah. Belitan primer digulungkan terlebih dulu, setiap lapisan gulungan dipisahkan dengan kertas yang berfungsi sebagai isolasi.

Bentuk inti lainnya adalah bentuk **M**- yang sebenarnya akan membentuk tipe yang sama dengan tipe **Shell gambar-4.9**

Bentuk UI atau sering disebut jenis inti banyak dipakai untuk trafo dengan daya kecil untuk peralatan elektronika.

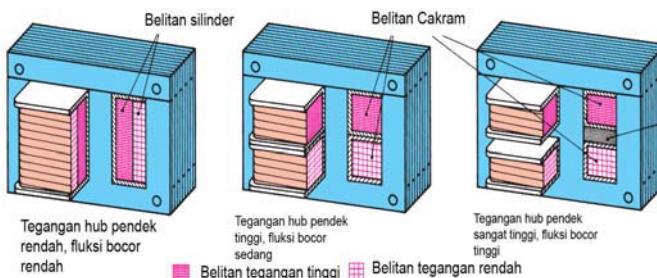
gambar 4.9a :



Gambar 4.9 : Inti Trafo tipe EI satu Phasa

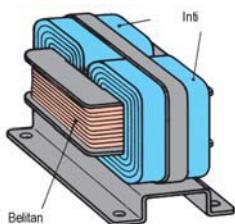
Belitan sekunder trafo jenis Shell diperlihatkan pada **gambar-4.10** dibawah ini.

1. Cara pertama belitan primer dibelitkan diatas tumpang tindih dengan belitan sekunder.
2. Cara kedua belitan primer dibelitakan diatas, dibawahnya belitan sekunder.
3. Cara ketiga sama dengan cara kedua, ditambahkan isolasi untuk memisahkan dua belitan.



Gambar 4.10 : Susunan belitan primer dan sekunder

Jumlah belitan dan penampang kawat belitan primer dan sekunder berbeda ukuran, disesuaikan dengan tegangan dan besarnya arus yang mengalir dimasing belitan primer dan sekunder.



Gambar 4.11 : Inti Trafo jenis pelat digulung

Bentuk inti trafo yang lainnya tampak seperti **gambar-4.11** disamping. Belitan primer dan sekunder digulung dalam satu kern. Sedangkan inti merupakan pita berbentuk memanjang yang dibelitkan di dua sisi trafo sampai mengisi penuh belitan kawatnya. Selanjutnya kedua gulungan inti diikat dengan pelat sehingga inti tidak terlepas.

4.6. Rangkaian Listrik Transformator

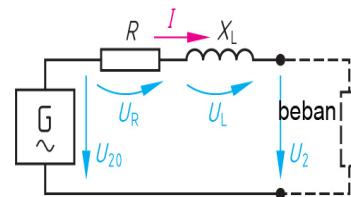
Rangkaian pengganti trafo **gambar-4.12** terdiri R menyatakan resistansi belitan primer dan sekunder. Induktor X_L , menyatakan induktansi belitan primer dan sekunder. Komponen Impedansi Z terdiri R dan X_L dalam satuan Ohm. Drop tegangan pada resistor sebesar $U_R = I \cdot R$, drop tegangan di induktor sebesar $U_L = I \cdot X_L$. Tegangan U_2 menyatakan tegangan sekunder. Tegangan U_{20} merupakan penjumlahan vektor tegangan U_2 , U_R dan U_L .

Besarnya tegangan terminal :

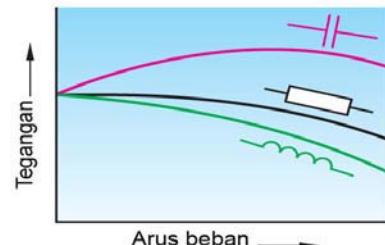
$$U_2 = U_{20} - U_R - U_L$$

$$U_2 = U_{20} - I \cdot R - I \cdot X_L$$

Beban trafo dapat berupa resistor R , induktor L atau kapasitor C . **Gambar- 4.13** memperlihatkan karakteristik tegangan sekunder dan peningkatan arus beban. Dengan beban kapasitor C , ketika arus meningkat tegangan terminal lebih besar. Saat diberi beban resistor R ketika arus meningkat beban terminal menurun. Dengan beban induktor L ketika arus meningkat, tegangan terminal sekunder menurun tajam.

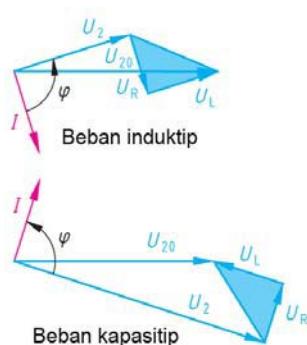


Gambar 4.12 : Rangkaian ekivalen Trafo



Gambar 4.13 : Grafik tegangan sekunder fungsi arus beban

4.7. Diagram Vektor Tegangan



Gambar 4.14 : Vektor tegangan
a) beban induktif b) beban kapasitif

Vektor diagram **gambar-4.14a**, menggambarkan tegangan dan arus trafo dengan beban induktor. Tegangan sekunder U_2 penjumlahan tegangan induksi U_{20} , U_R dan U_L . Antara tegangan U_2 dan arus I berbeda phasa sebesar φ , dimana arus I terbelakang (lagging) sebesar 90° . Tegangan U_2 lebih kecil dibandingkan tegangan U_{20} .

Vektor diagram, **gambar-4.14b**, trafo dengan beban kapasitor. Tegangan sekunder U_2 penjumlahan vektor tegangan induksi U_{20} , U_R dan tegangan U_L . Tegangan U_2 dan arus I berbeda sudut phasa sebesar φ , dimana arus I mendahului (leading) sebesar 90° .

Dalam praktiknya beban trafo lebih bersifat resistif atau beban impedansi (gabungan resistor dan induktor)

4.8. Rugi-rugi Transformator

Ada dua jenis kerugian dalam transformator, yaitu **rugi inti** dan **rugi tembaga**. Untuk mengukur rugi inti dilakukan dengan pengujian trafo tanpa beban dan untuk mengukur rugi tembaga dilakukan dengan pengujian trafo hubung singkat.

a. Pengujian Trafo Tanpa Beban.

Pengujian trafo tanpa beban dimaksudkan untuk mengukur rugi-rugi pada inti trafo. Rugi inti trafo disebabkan oleh proses magnetisasi dan histerisis. Pengukuran rugi inti seperti **gambar-4.15a**. Bagian primer trafo dipasang Wattmeter dan Voltmeter. Bagian sekunder trafo tanpa beban.

Rugi-rugi inti trafo = penunjukan wattmeter

Sebuah trafo dalam pengukuran tanpa beban penunjukan Voltmeter U_{1n} 220 V, penunjukan wattmeter 20 W. dipasang ampermeter penunjukan arus 0,68 A. Maka dapat dilakukan analisis rugi-rugi trafo sebagai berikut.

$$S = U \cdot I = 220 \text{ V} \cdot 0,68^\circ = 149,6 \text{ VA}$$

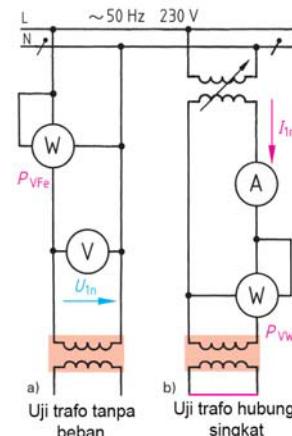
$$Z = U/I = 220/0,68 = 323,5 \Omega$$

$$\cos \varphi = P/S = 20W/149,6A = 0,1337$$

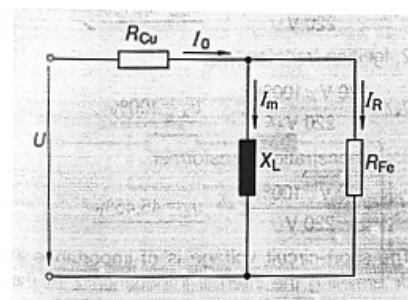
$$\varphi = \text{arc } 0,1337 = 82^\circ$$

Transformator tanpa beban, yang mengalir hanya arus sisi primer I_0 sebesar 0,68 A yang melalui tahanan tembaga R_{CU} . Arus tanpa beban I_0 terdiri atas arus magnetisasi I_m yang melalui induktansi X_L dan arus aktif I_R . yang melewati tahanan inti besi R_{FE} dengan sudut $\varphi = 82^\circ$ **gambar 4.16**.

Vektor tegangan U tegak lurus dengan arus magnetisasi I_m . Sedangkan tegangan U beda sudut phasa dengan arus I_0 sebesar $\varphi = 82^\circ$ **gambar 4.17**. Arus I_0 terukur oleh ampermeter dibagian primer sebenarnya merupakan komponen arus magnetisasi I_m dan arus aktif I_R .



Gambar 4.15 : Pengawatan
a) Uji trafo tanpa beban
b) Uji trafo hubung singkat



Gambar 4.16 : Rangkaian pengganti Trafo tanpa beban

b. Pengujian Trafo Hubung Singkat

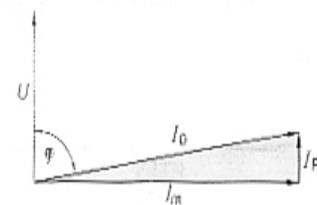
Pengujian Trafo hubung singkat dilakukan untuk mengukur besarnya kerugian tembaga pada trafo. Pengukuran rugi-rugi tembaga dilakukan dengan cara seperti **gambar-4.15b**. Trafo bagian primer dihubungkan dengan sumber tegangan yang bisa diatur besarnya, dipasang Ampermeter dan Wattmeter.

Belitan sekundernya dihubung singkatkan. Besar tegangan primer U_k antara 5% sd 10% dari tegangan primer. Tegangan diatur dari paling kecil, dinaikkan bertahap sampai Ampermeter menunjukkan arus primer nominalnya I_{1n} .

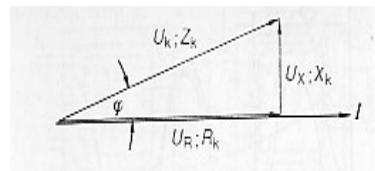
Besarnya rugi-rugi tembaga = penunjukan wattmeter

Pengujian hubung singkat trafo dihasilkan data pengukuran wattmeter 60 W, penunjukan ampermeter 3 A pada tegangan 21 V. Maka dapat dilakukan analisis sebagai berikut:

$$U_k = \frac{21V \cdot 100\%}{220V} = 9,54\%$$



Gambar 4.17 : Vektor tegangan dan arus pada Uji tanpa beban



Gambar 4.18 : Vektor tegangan dan arus pada Uji hubung singkat

Saat dilakukan pengujian hubung singkat dapat ditentukan impedansi internal trafo Z dan kerugian tembaga pada belitan P_{cu} .

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{60W}{21V \cdot 3A} = 0,95 \quad \varphi = 18^\circ$$

Tegangan U_k sephasa dengan komponen impedansi Z_k , tegangan U_R sephasa dengan komponen tahanan tembaga R dan tegangan U_X sephasa dengan komponen induktansi X_k **gambar-4.19**.

$$U_R = U \cdot \cos \varphi = 21V \cdot 0,95 = 19,95 \text{ V}$$

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{21V}{3A} = 7 \Omega$$

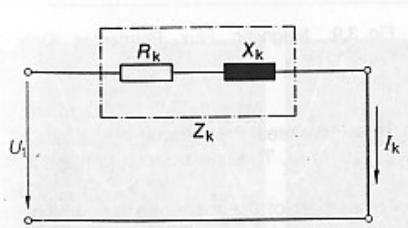
$$R_k = Z \cdot \cos \varphi = 7\Omega \cdot 0,95 = 6,65 \Omega$$

$$U_X = U \cdot \sin \varphi = 21V \cdot 0,31 = 6,51 \text{ V}$$

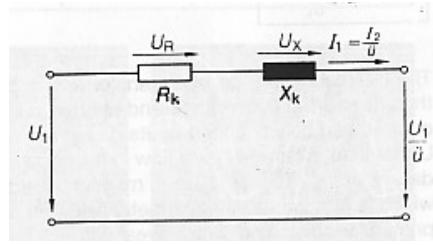
$$X_K = Z \cdot \sin \varphi = 7\Omega \cdot 0,31 = 2,17 \Omega$$

Besarnya rugi-rugi tembaga = penunjukan wattmeter = **60 W**

Komponen tahanan tembaga R_K , komponen induktansi X_K dari sebuah transformator diperlihatkan pada **gambar-4.20**.



Gambar 4.19 : Rangkaian pengganti Trafo sekunder dihubung singkat



Gambar 4.20 : Rangkaian pengganti Trafo dengan komponen resistansi dan induktansi

Kesimpulan dari kedua pengujian trafo, yaitu uji trafo tanpa beban dan pengujian trafo hubung singkat dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Besarnya rugi inti trafo : **20 W**
2. Besarnya rugi tembaga : **60 W**
3. Parameter tegangan hubung singkat UK : **9,54%**

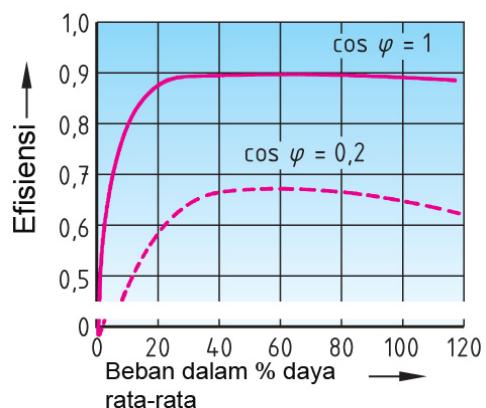
4.9. Efisiensi Transformator

Efisiensi trafo dinyatakan dalam angka prosentase, pada faktor kerja $\cos \varphi = 0,2$ efisiensi trafo mencapai sekitar 65%. Pada beban dengan faktor kerja $\cos \varphi = 1,0$, efisiensi trafo bisa mencapai 90%, **gambar-4.21**.

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{ab} + P_{VFe} + P_{cu}}$$

Trafo berdaya kecil 250 VA; $\cos \varphi = 0,7$; rugi inti 10 Watt dan rugi tembaga 15 Watt. Efisiensi trafo dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$\eta = \frac{175W}{175W + 10W + 15W} = \frac{175w}{200w} = 0,875$$



Gambar 4.21 : Grafik Arus Hubung Singkat Trafo Grafik Arus Hubung Singkat Trafo

4.10. Akibat Hubung Singkat

Kejadian hubung singkat pada trafo bisa berakibat fatal, misalnya belitan primer atau sekunder terbakar. Penyebabnya bisa karena isolasi antara belitan primer dan sekunder cacat dan terkelupas, atau terjadi hubung singkat pada belitan sekundernya.

Untuk menghindari akibat buruk hubung singkat trafo dipasang kan alat pengaman, misalnya sekering atau pemutus daya *Circuit Breaker*. Ketika terjadi hubung singkat akan terjadi arus hubung singkat **gambar-4.22** yang sangat besar dan bisa merusak belitan tembaga baik sisi primer atau sisi belitan sekundernya.

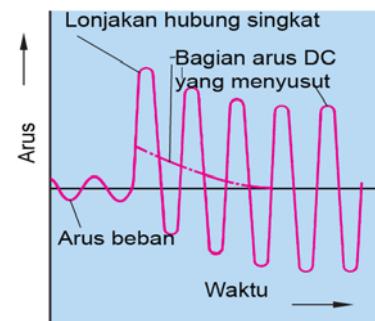
Besarnya arus hubung singkat :

$$I_{KD} = \frac{I_n}{U_K} \cdot 100\%$$

I_{KD} Arus hubung singkat

I_n Arus nominal

U_k Tegangan hubung singkat



Gambar 4.22 : Grafik efisiensi Transformator

Sebuah trafo 220 V/24 V, arus 1 A/9 A, prosentase hubung singkat $U_k= 5\%$, hitung besarnya arus hubung singkat.

$$I_{KD} = 100\% \cdot \frac{I_n}{U_K} = 100\% \cdot \frac{9A}{5\%} = 180 \text{ A.}$$

$$i_s \geq 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{KD}$$

$$i_s \geq 2.55 \cdot I_{KD} = 2.55 \times 180 \text{ A} = 459 \text{ A.}$$

4.11. Autotransformator

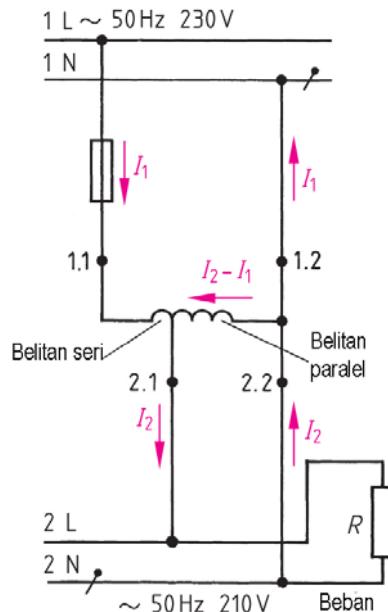
Autotransformator termasuk trafo yang dibuat dengan rancangan berbeda, karena belitan primer dan belitan sekunder menggunakan satu belitan. Sehingga ada belitan yang terhubung seri dan ada belitan yang terhubung secara paralel, **gambar-4.23**.

Rumus untuk *Autotransformator* tetap berlaku persamaan :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

Autotrafo jumlah belitan primer N_1 300 belitan, jumlah belitan sekunder N_2 sebanyak 207 belitan. Jika tegangan sekunder U_2 sebesar 270 Volt. Besarnya tegangan sisi primer.

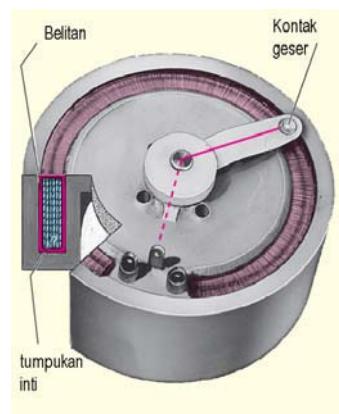
$$U_1 = \frac{U_1 \cdot N_1}{N_2} \frac{207V \cdot 300V}{270} = 230 \text{ V}$$



Gambar 4.23 : Rangkaian listrik Autotransformator

Konstruksi *Autotransformator* yang umum kita temukan berbentuk bulat seperti **gambar-4.24**. Tegangan primer konstan dihubungkan dengan jala-jala PLN. Tegangan sekunder berubah-ubah dengan cara memutar kenop yang dapat berputar. Dengan memutar kenop pada sudut tertentu, menentukan jumlah belitan sekundernya, sehingga tegangan sekunder berbanding dengan sudut putaran kenop putarnya.

Autotrafo memiliki efisiensi yang baik sekali mendekati 98% dikarenakan rugi-rugi tembaga dan rugi inti trafo sangat kecil. Tetapi yang harus diperhatikan pemasangan penghantar phasa dan netral tidak boleh terbalik, karena berakibat tegangan 220 V yang membahayakan.



Gambar 4.24 : Autotrafo dengan bentuk inti toroida

4.12. Transformator Khusus

Untuk kebutuhan khusus seperti trafo untuk pengelasan logam **gambar-4.25** diperlukan karakteristik khusus, seperti tegangan kecil tetapi arusnya sangat besar dan arus bisa diatur sesuai kebutuhan. Untuk pengelasan logam tipis arus yang dipakai kecil, sedangkan untuk pengelasan logam yang tebal dibutuhkan arus yang besar.

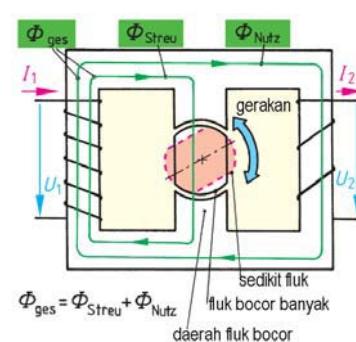
Untuk itu dibuatlah inti bagian tengah terpisah dengan inti utama dan dapat diputar kanan atau kiri. Pada saat inti yang diputar segaris dengan inti utama, garis gaya magnet maksimal dan arus sekunder lebih besar. Ketika inti yang diputar bergeser dari garis lurus, garis gaya magnet mengecil dan arus sekunder lebih kecil.

Cara kerja trafo pengelasan **gambar-4.26**, sebelum elektro las disentuhkan ke benda kerja. tegangan sekunder $U_0 = 70$ V. Ketika elektro las menyentuh benda kerja logam, terjadi hubung singkat tegangan diujung elektrode 2 V dan arus lewat elektroda 150 A. Ada tegangan U_D 68 V didrop pada pada induktor.

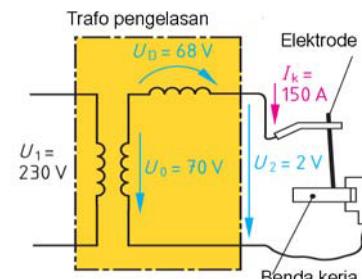
Karakteristik tegangan dan arus trafo las **gambar-4.27**, menunjukkan tegangan 70 V dan arus sekunder sampai 150 A. Saat elektrode las menyentuh benda kerja logam, terjadi hubung singkat pada belitan sekunder, tegangan disekunder trafo tetap 70 V dan tegangan diujung elektroda hanya 2 V.

Trafo Welding (mesin las) dirancang khusus mampu menahan arus hubung singkat yang besar secara terus menerus, sebagai akibatnya faktor kerja trafo las rendah antara 0,4 sampai 0,5.

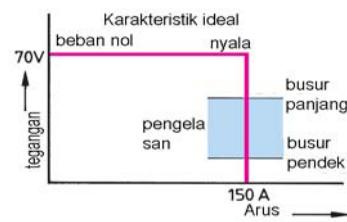
Grafik **gambar-4.27** menjelaskan beda tegangan pada elektrode las sebanding dengan arus yang dipakai. Pada arus 40 A tegangan sekitar 55A. Saat arus 80 A, tegangan dielektrode 40 A. Daerah kerja trafo berada saat arus antara 80 A sampai 130 A.



Gambar 4.25 : Prinsip Transformator khusus untuk Welding



Gambar 4.26 : Rangkaian Trafo Welding

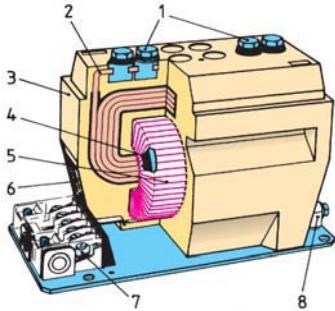


Gambar 4.27 : Grafik tegangan fungsi arus, pada Trafo Welding

4.13. Transformer Pengukuran

Untuk pengukuran tegangan dan arus yang besar diperlukan trafo pengukuran. Tujuannya untuk menyesuaikan besaran pengukuran dengan kemampuan alat ukur, disamping untuk keamanan manusia. Pemakaian trafo pengukuran tidak hanya untuk Voltmeter, Ampermeter, Kwhmeter saja, tetapi untuk mengoperasikan berbagai peralatan kontrol relay tegangan, relay arus, relay bimetal dsb.

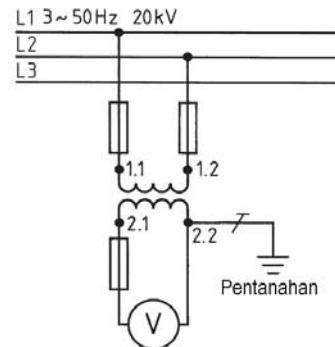
4.14. Trafo Pengukuran Tegangan



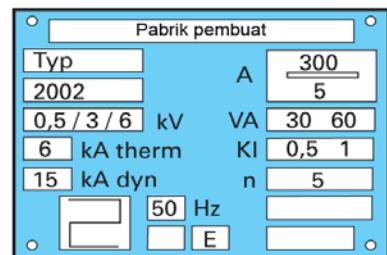
1. sambungan belitan input
2. belitan input
3. perekam panas
4. inti besi
5. belitan output
6. name plate
7. terminal belitan input
8. sekrup ground

Panel distribusi dengan tegangan menengah 20 KV atau panel tegangan tinggi 150 KV menggunakan trafo pengukuran tegangan (*Potential Transformer = PT*), untuk menurunkan tegangan 150KV atau 20KV menjadi 100 V. Untuk arus beban yang lebih besar 50 A dipakai trafo arus (*Current Transformer = CT*) **gambar-4.28** untuk menurunkan arus menjadi 1 A atau 5 A.

Gambar 4.28 : Bentuk fisik Trafo Arus (CT)



Gambar 4.29 : Pengukuran dengan trafo tegangan (PT)



Gambar 4.30 : Name plate Trafo tegangan

Tegangan primer 10.000 V

Tegangan sekunder	100 V
Tegangan kerja	12, 28, 35, 75 KV
Daya trafo	100 – 150 VA
Presisi pengukuran	0,2 – 0,5%
Frekuensi	50 Hz

4.15. Trafo Pengukuran Arus

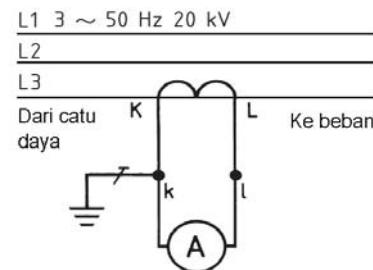
Untuk pengukuran arus beban yang besar digunakan trafo pengukuran arus (*Current Transformer =CT*). Trafo CT dipasang pada jala-jala seperti **gambar-4.31** dengan terminal K menghadap sisi supply daya, dan terminal L menghadap sisi beban. Terminal K harus dihubungkan dengan bumi untuk mengaman kan dari tegangan sentuh yang berbahaya jika ada gangguan kerusakan CT.

Ampermeter yang digunakan memiliki batas ukur 1 A atau 5 A dengan skala pengukuran sesuai kebutuhan. Yang perlu diperhatikan ratio arus primer dan arus sekunder trafo CT (CT ratio 300A/5A)

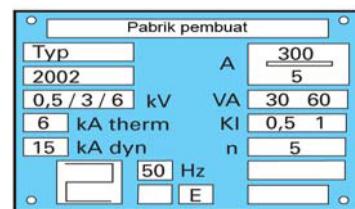
Jika terjadi kerusakan pada alat ukur atau alat kontrol yang dihubungkan dengan trafo pengukuran arus CT, maka sisi sekunder trafo arus harus dihubungsingkatkan. Jika tidak akan berbahaya karena akan menimbulkan tegangan induksi yang sangat tinggi dan berbahaya.

Spesifikasi teknis trafo CT dapat dibaca pada nameplate yang menempel di bagian badan trafo CT **gambar-4.33**. Informasi yang terkandung mencakup data-data sbb:

Tegangan nominal	:	0,5/ 3/ 6 kV
Ratio arus	:	300 A / 5 A
Arus thermal	:	6 kA
Arus dinamik	:	15 kA
Daya trafo	:	30- 60 VA
Presisi pengukuran	:	0,5 – 1,0 %
Frekuensi	:	50 Hz



Gambar 4.31 : Pengukuran dengan Trafo Arus



Gambar 4.32 : Nameplate Trafo Arus

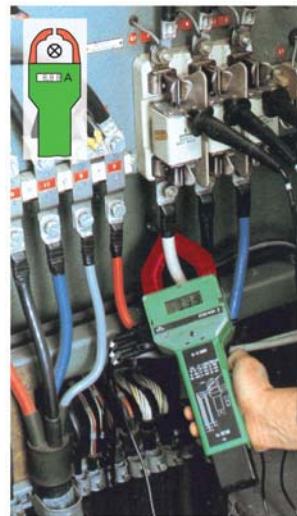


Gambar 4.33 : Keterangan nameplate Trafo Arus

Trafo arus dalam bentuk portabel untuk kebutuhan pemeriksaan atau pemeliharaan dipakai jenis tang amper dengan sistem digital **gambar-4.34**. Cara penggunaannya sangat praktis, tekan tang amper masukkan salah satu kabel phasa yang akan diukur, periksa batas ukurnya dan penunjukan amper terbaca secara digital.

Tang amper juga dapat mengukur daya listrik *KW-meter* dengan menghubungkan kabel clip-on tegangan ke phasa R, S, T dan N.

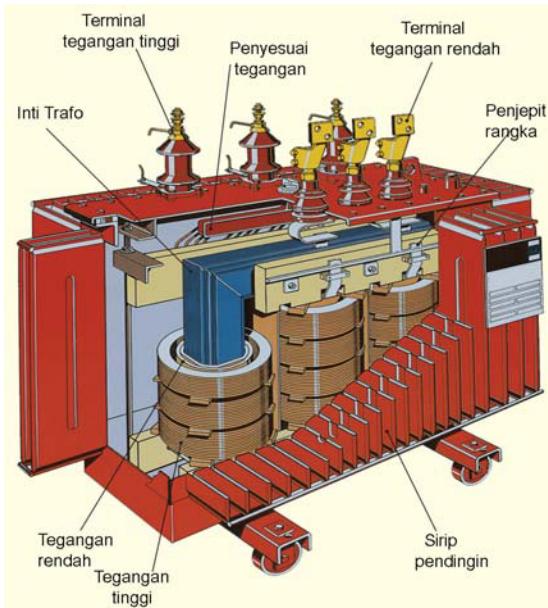
Tang amper sangat bermanfaat untuk mengukur arus beban tiap-tiap phasa untuk mengetahui keseimbangan arus. Arus beban yang tidak seimbang berpotensi merusak alat listrik. Dengan metode tertentu tang amper bisa digunakan untuk melacak jika terjadi pencurian listrik yang disengaja.



Gambar 4.34 : Aplikasi Trafo arus sebagai meter portable

4.16. Transformer 3 Phasa

Transformer 3 phasa digunakan untuk sistem listrik berdaya besar, baik pada sistem pembangkitan, transmisi maupun distribusi. Transformer 3 phasa yang umum kita lihat pada gardu distribusi daya 250 KVA sampai 630 KVA berbentuk persegi **gambar-4.35**.



Gambar 4.35 : Bentuk fisik Transformator tiga phasa

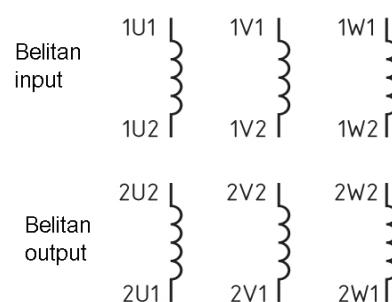
Konstruksi transformator 3 phasa untuk daya besar dalam bentuk potongan lihat **gambar-4.36**. Inti trafo berbentuk E-I dengan belitan primer dan sekunder pada ketiga kaki inti trafo. Terminal tegangan tinggi (primer) tampak dari isolator yang panjang. Terminal tegangan rendah (sekunder) dengan terminal lebih pendek.

Trafo ditempatkan dalam rumah trafo yang diisi dengan minyak trafo yang berfungsi sebagai pendingin sekaligus isolasi. Secara berkala minyak trafo diganti. Pendinginan rumah trafo disempurnakan dengan dipasang sirip pendingin agar panas mudah diserap oleh udara luar. Bagian terpenting dari trafo 3 phasa.

Trafo 3 phasa bisa dibangun dari dua buah trafo satu phasa, atau tiga buah trafo satu phasa. Untuk trafo 3 phasa berukuran berdaya besar, dibangun dari tiga buah trafo satu phasa, tujuannya jika ada salah satu phasa yang rusak/terbakar, maka trafo yg rusak tersebut dapat diganti dengan cepat dan praktis.

Trafo 3 phasa memiliki enam belitan **gambar-4.36**. Tiga belitan primer dan tiga belitan sekunder. Belitan primer diberikan nomor awal 1, belitan 1U1 – 1U2 artinya belitan primer phasa U.

Belitan sekunder diberikan notasi nomor awal 2, misalnya 2U2-2U1, artinya belitan sekunder phasa U. Belitan primer atau sekunder dapat dihubungkan secara *Bintang* atau hubungan *Segitiga*.



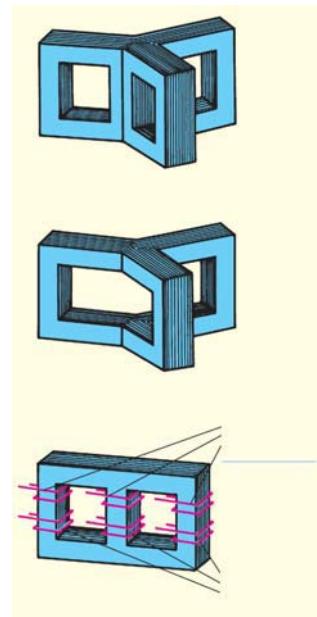
Gambar 4.36 : Belitan primer dan sekunder Trafo tiga phasa

4.17. Inti Transformer 3 Phasa

Bahan inti trafo 3 phasa dari bahan plat tipis ferromagnetis yang ditumpuk dengan ketebalan tertentu. Pelat tipis dimaksudkan untuk menekan rugi-rugi histerisis dan arus eddy pada batas minimal. Ada beberapa tipe inti trafo 3 phasa tampak pada **gambar-4.37**.

Tipe **U-I** terdiri dari tiga inti yang dipasangkan sudut menyudut 120° **gambar-4.37a**. Tipe U terdiri atas tiga inti U dipasang sudut menyudut 120° **gambar-4.37b**. Tipe menyudut ini dipakai untuk trafo 3 phasa yang dipasang pada tabung bulat untuk trafo outdoor yang dipasang pada tiang jaringan distribusi.

Tipe **E-I** yang banyak dipakai, tiap kaki terdapat belitan primer dan sekunder masing-masing phasa **gambar-4.37c**. Tipe jenis ini banyak dipakai untuk daya kecil, sedang sampai daya besar. Bahkan tiga buah trafo satu phasa yang digabungkan, bisa menjadi trafo tiga phasa.



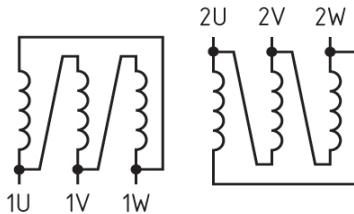
Gambar 4.37 : Bentuk inti Trafo 3 Phasa

4.18. Hubungan belitan Transformator

Ada dua metoda hubungan belitan primer dan belitan sekunder. Pertama hubungan **Bintang**, kedua hubungan **Segitiga**. Pada **gambar-4.39**, baik belitan primer dan sekunder dihubungkan secara **Bintang**. Belitan primer terminal 1U, 1V dan 1W dihubungkan dengan supply tegangan 3 phasa. Belitan sekunder terminal 2U, 2V dan 2W disambungkan dengan sisi beban.

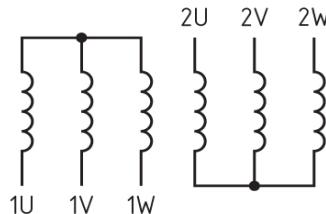
Hubungan belitan **Segitiga** baik pada belitan primer maupun belitan sekunder **gambar-4.38**. Pada hubungan Bintang tidak ada titik netral, yang diperoleh ketiganya merupakan tegangan line ke line, yaitu L1, L2 dan L3.

Hub segitiga primer-sekunder



Gambar 4.38 : Trafo tiga phasa belitan primer dan sekunder hubungan Bintang

Hub bintang primer-sekunder



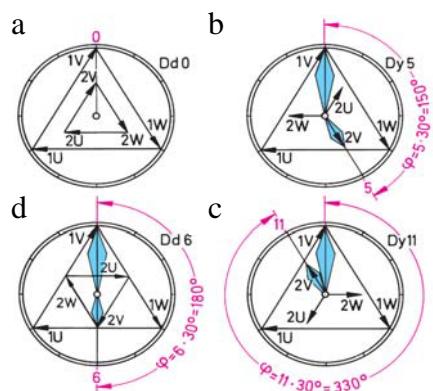
Gambar 4.39 : Trafo tiga phasa belitan primer dan sekunder hubungan Segitiga

4.19. Hubungan Jam Belitan Trafo

Transformator 3 phasa antara tegangan primer dan tegangan sekunder perbedaan phasa dapat diatur dengan metoda aturan hubungan jam belitan trafo. Satu putaran jam dibagi dalam 12 bagian, jika satu siklus sinusoida 360° , maka setiap jam berbeda phasa 30° ($360^\circ/12$).

Belitan trafo Dd0 **gambar-4.40a**, menunjukkan huruf **D** pertama belitan primer dalam hubungan **Delta** (segitiga), huruf **d** kedua belitan sekunder hubungan Delta(segitiga), angka 0 menunjukkan beda phasa tegangan primer-sekunder 0° .

Belitan trafo Dy5 **gambar-4.40b**, menunjukkan belitan primer dalam hubungan **Delta** (segitiga), belitan sekunder **Y** (bintang), beda phasa antara tegangan primer- sekunder $5 \times 30^\circ = 150^\circ$.



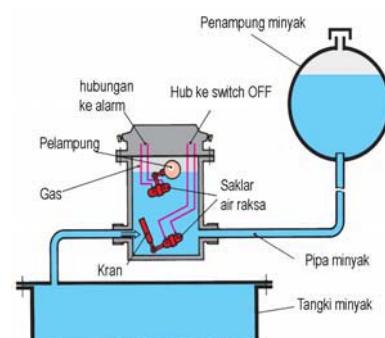
Gambar 4.40 : Vektor kelompok Jam pada Trafo 3 phasa

Belitan trafo Dy-11 **gambar-4.40c**, menunjukkan belitan primer dalam hubungan **Delta** (segitiga), belitan sekunder **Y** (bintang), beda phasa antara tegangan primer-sekunder $11 \times 30^\circ = 330^\circ$.

4.20. Minyak Trafo dan Relay Buchholz

Untuk mendinginkan trafo dipakai minyak trafo yang berfungsi sebagai isolasi. Cadangan minyak trafo ditempatkan dalam tangki terpisah yang letaknya lebih tinggi dari rumah trafo. Antara tangki cadangan minyak trafo dan rumah trafo ditempatkan relay Buchholz berupa dua tabung mercury yang fungsinya berbeda **gambar-4.41**.

Relay tabung mercury pertama mengaman kan jika level minyak trafo berkurang, maka relay akan memutuskan circuit breaker dan tegangan listrik putus. Relay tabung mercury kedua mendeteksi jumlah



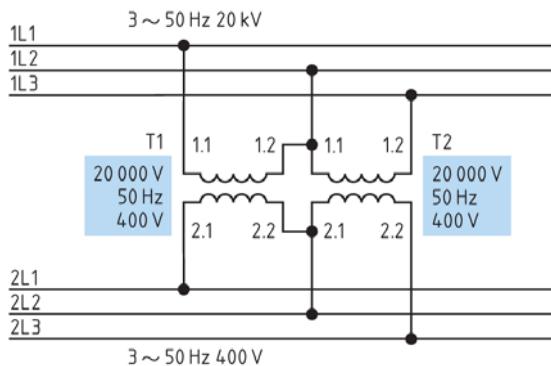
Gambar 4.41 : Relay Buchholz

gas dalam ruang, jika trafo mengalami pemanasan yang berlebihan, relay tabung mercury akan memutuskan *circuit breaker* dan tegangan primer trafo aman.

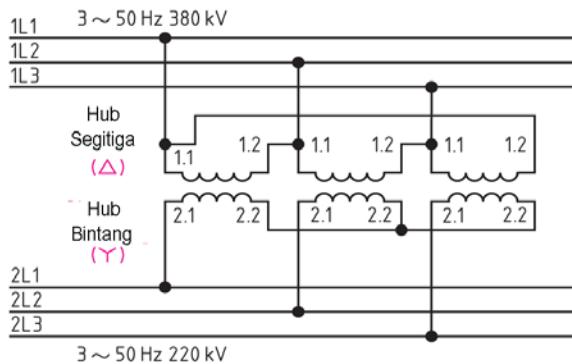
4.21. Konfigurasi Transformator 3 phasa

Disamping hubungan bintang dan segitiga dikenal juga hubungan segitiga terbuka (*open delta- VV connection*) dan hubungan Zig-zag. Hubungan segitiga terbuka **gambar-4.42**, terdiri dari dua trafo. Tegangan primer 20 KV dan tegangan sekunder 400 V.

Dalam hubungan segitiga terbuka kapasitas maksimum beban besarnya = **0,577 x kapasitas trafo 3 phasa**. Contoh dua buah trafo 10 KVA dalam konfigurasi segitiga terbuka, daya maksimumnya = $0,577 \times 3 \times 10$ KVA = **17.32 KVA** saja.



Gambar 4.42 : Trafo 3 phasa hubungan Segitiga terbuka (hubungan VV)



Gambar 4.43 : Trafo tiga phasa dengan belitan primer hubungan Segitiga, belitan sekunder hubungan Bintang

Berikut ini konfigurasi hubungan bintang dan segitiga **gambar-43** untuk transformator transmisi tegangan tinggi. Jala-jala tegangan tinggi 380 KV diturunkan tegangan menjadi 220 KV. Agar tegangan benar-benar simetris dari ketiga phasa, harus diperhatikan **rasio belitan N1/N2** dari ketiga trafo harus sama.

4.22. Transformator dalam Jaringan Asimetris

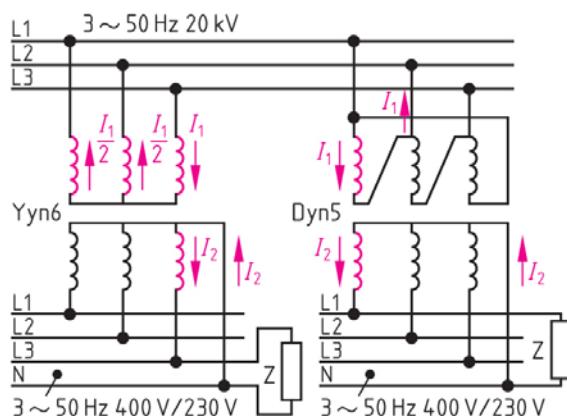


Gambar 4.44 : Pemasangan Trafo Outdoor

Jaringan distribusi untuk melayani pelanggan rumah tangga atau komersial dicatut dari PLN dengan tegangan 20 KV dan diturunkan menjadi 400 V/230 V dengan transformator 3 phasa jenis pasangan luar **gambar-4.44**.

Dalam jaringan distribusi yang melayani kelompok rumah tangga sering terjadi kondisi beban tidak seimbang. Artinya beban antar phasa tidak sama, ada yang lebih besar atau lebih kecil. Kondisi beban asimetris diatasi dengan penggunaan trafo dalam hubungan *Yyn6*; *Dyn5* atau *Yzn5*.

Satu trafo distribusi dengan daya 400 KVA bisa melayani antara 200 sd 300 rumah tinggal dengan beban antara 2 KVA sampai 1,3 KVA tiap rumah. Rumah tinggal menggunakan suply satu phasa yang diambil dari salah satu dari tiga phasa yang ada. Dalam satu blok rumah menggunakan phasa R dan N, blok lainnya phasa S dan N, blok lainnya phasa T dan N. Problem muncul karena beban masing-masing phasa tidak seimbang.



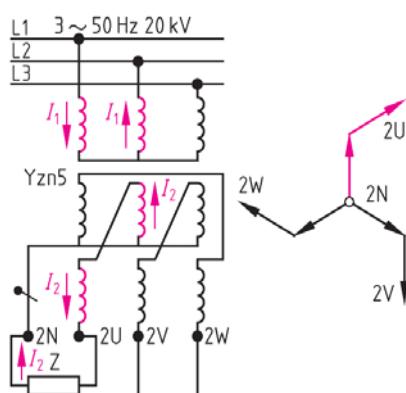
Gambar 4.45 : Trafo daya (*Yyn6* dan *Dyn5*) dengan beban asimetris

primer dan sekunder 150° . Saat beban sekunder L_1 dan N mengalir I_2 , phasa R dan N . Pada belitan primer mengalir I_1 dari L_1 dan L_2 .

Hubungan *Yyn6* pada **gambar-4.45a**, belitan primer 20 KV dan sekunder 400 V dalam hubungan segitiga dengan netral. Beda phasa tegangan primer dan sekunder 180° . Perhatikan beban sekunder terpasang pada L_3 dan N , arus yang mengalir sebesar I_2 . Pada sisi primer kita anggap phasa T mendapat beban sebesar I_1 , sedang phasa R dan S mendapat beban sebesar $\frac{1}{2} I_1$.

Hubungan *Dyn5* pada **gambar-4.45b**, belitan primer 20 KV dalam hubungan segitiga, belitan sekunder 400 V dalam hubungan bintang, beda phasa tegangan

Transformer dengan hubungan Zig-zag memiliki ciri khusus, yaitu belitan primer memiliki tiga belitan, belitan sekunder memiliki enam belitan. Hubungan **Yzn5 gambar-4.46** menunjukkan belitan primer 20 KV terhubung dalam bintang L_1 , L_2 dan L_3 tanpa netral N.



Belitan sekunder 400 V merupakan hubungan Zig-zag dimana hubungan dari enam belitan sekunder saling menyilang satu dengan lainnya. Saat beban terhubung dgn phasa U dan N arus sekunder I_2 mengalir melalui belitan phasa phasa U dan phasa S. Bentuk vektor tegangan Zig-zag garis tegangan bukan garis lurus, tetapi menggeser dengan sudut 60° .

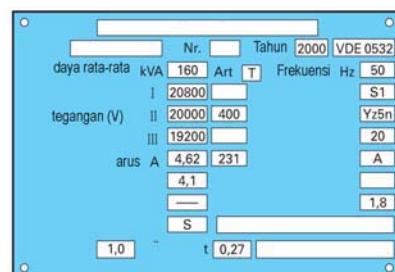
Gambar 4.46 : Trafo daya Yzn5 dan bentuk vektor tegangan sekundernya

4.23. Pengelompokan Hubungan Transformer

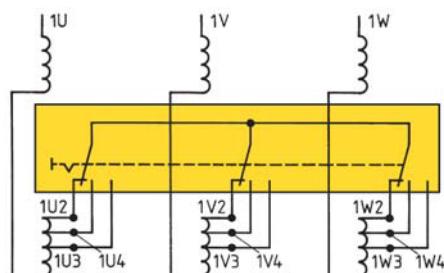
Hubungan belitan transformator 3 phasa sesuai dengan **Tabel-4.1** terbagi dalam kelompok jam 0 (beda phasa 0°) dan kelompok jam 5 (beda phasa 150°). Belitan primer dikelompokkan dalam hubungan bintang dan segitiga, sedangkan belitan sekunder ada hubungan **bintang, segitiga dan zig-zag**.

Nameplate transformator 3 phasa pada **gambar4.-47** menjelaskan daya trafo 160 KVA, tegangan primer 20 KV, dengan tiga tahapan tapping, tegangan sekunder 400 V. Arus primer 4,62 A dan arus sekunder 231 A. Impedansi trafo 4%, frekuensi 50 Hz, Hubungan belitan trafo Yzn5, Klas isolasi A kemampuan hubung singkat 1,8 detik.

Rugi tegangan pada tegangan menengah 20 KV pasti terjadi karena pengaruh panjang kabel dan pengaruh



Gambar 4.47 : Namplate Trafo daya tiga phasa.



Gambar 4.48 : Pengaturan Tapping terminal Trafo Distribusi

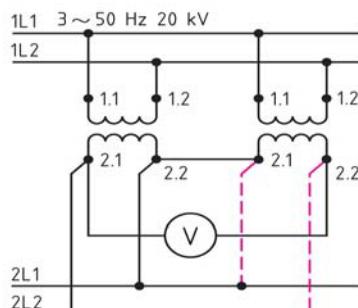
beban. Tapping trafo pada **gambar-4.48** belitan primer dilakukan agar ratio N_1/N_2 tetap konstan, sehingga rugi tegangan tidak berpengaruh pada tegangan sekunder. Ada tiga tapping sesuai *nameplate*, yaitu pada tegangan 20.800 V, tegangan 20.000 V dan tegangan 19.200 V.

Tabel 4.1 Grup rangkaian umum untuk arus putar-transformator daya

simbol bilangan	grup rangkaian	penulisan teg. tinggi	gambar rangkaian teg. tinggi teg. rendah	penulisan teg. rendah	ratio $U_1 : U_2$	simbol rangkaian
0	Yy0				$\frac{N_1}{N_2}$	
5	Dy5				$\frac{N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2}$	
	Yd5				$\frac{\sqrt{3} \cdot N_1}{N_2}$	
	Yz5				$\frac{2N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2}$	

4.24. Paralel Dua Transformator

Paralel dua transformator dilakukan dengan cara menyambungkan secara paralel dua transformator. Tujuannya untuk mendapatkan kapasitas daya yang tersedia lebih besar sesuai kebutuhan beban.



Gambar 4.49 : Paralel Dua Trafo satu phasa

Prosedur paralel trafo satu phasa dengan menyambungkan dua trafo **gambar-4.49**. Terminal 2.1 trafo-1 dihubungkan Voltmeter ke terminal 2.2 trafo-2. Terminal 2.2 trafo-1 disambungkan ke terminal 2.1 trafo-2. Jika penunjukan Voltmeter 230 V berarti dicapai beda tegangan nominal.

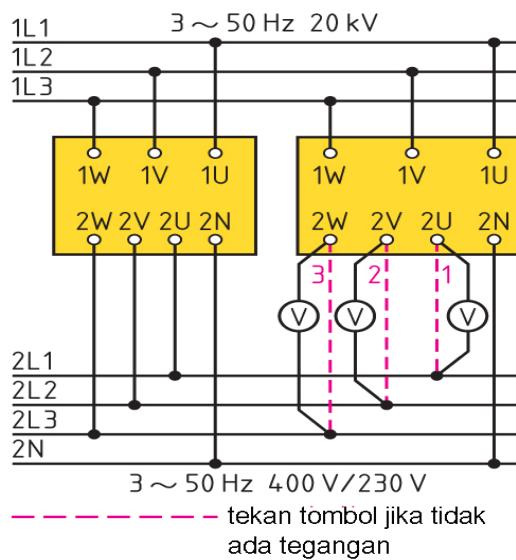
Lepaskan Voltmeter dan sambungan terminal 2.2 dan terminal 2.1 trafo-2. Kemudian Trafo-2 terminal 2.1 sambungkan ke 2L1, terminal 2.2 ke 2L2.

Syarat teknis paralel dua transformator :

1. Tegangan kedua trafo harus sama
2. Ratio belitan N_1/N_2 kedua trafo sama.

Paralel dua tranfo 3 phasa **gambar-4.50** harus memenuhi persyaratan teknis sbb :

1. Ratio belitan N_1/N_2 kedua trafo identik sama termasuk setting tapping kedua trafo juga harus sama.
2. Impedansi kedua usahakan sama, trafo dengan kapasitas daya lebih kecil impedansinya harus lebih besar.
3. Ratio daya trafo besar dan kecil tidak melebihi 3 : 1.



Gambar 4.50 : Paralel Dua Trafo Tiga phasa

Sebelum dilakukan penyambungan paralel dilakukan pengecekan dengan Voltmeter, jika penunjukan adalah 0 Volt, dapat disambungkan terminal seperti gambar-40. Jika salah dalam hubungan Voltmeter maka penunjukan akan dua kali lipat tegangan terminalnya = 800 V

4.25. Rangkuman

- Mesin listrik dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu mesin listrik statis dan mesin listrik dinamis. Mesin listrik statis adalah transformator, mesin listrik dinamis terdiri atas motor listrik dan generator.
- Transformator :
 - a). memindahkan daya listrik dari satu sisi ke sisi lainnya.
 - b). tidak ada perubahan frekuensi
 - c). bekerja berdasarkan induksi elektromagnetis
 - d). dua rangkaian terjadi mutual induksi saling mempengaruhi
- Transformator ideal adalah trafo yang rugi-ruginya nol, artinya daya pada belitan primer sama dengan daya di belitan sekunder.
- Perbandingan tegangan primer dan sekunder disebut perbandingan transformasi. Perbandingan transformasi (\dot{U}) juga berlaku pada perbandingan belitan primer dan sekunder.
- Tegangan sekunder yang dihasilkan berbeda sudut phasa tegangan primer dengan sekunder sebesar 180° .
- Inti trafo dibuat dari bahan ferro magnetis berupa plat-plat tipis yang ditumpuk menjadi satu sehingga membentuk inti dengan ketebalan tertentu.
- Ada beberapa jenis inti trafo, diantaranya, bentuk EI, bentuk L, bentuk M, bentuk UI.
- Spesifikasi teknik sebuah transformator dicantumkan dalam *nameplate*, mencakup data pabrik pembuat, daya trafo, tegangan primer, tegangan sekunder, arus primer, arus sekunder, frekuensi dan impedansi trafo.
- Ada dua jenis kerugian dalam transformator, yaitu *rugi inti* dan *rugi tembaga*.
- Untuk mengukur rugi inti dilakukan dengan pengujian trafo tanpa beban dan untuk mengukur rugi tembaga dilakukan dengan pengujian trafo hubung singkat.
- Efisiensi trafo dinyatakan dalam angka prosentase, merupakan perbandingan antara daya output dengan daya input trafo.
- Autotransformator termasuk trafo yang dibuat dengan rancangan berbeda, karena belitan primer dan belitan sekunder menggunakan satu belitan.
- Trafo pengukuran ada dua jenis, yaitu trafo pengukuran tegangan (*Potensial Transformer*) dan trafo pengukuran arus (*Current Transformer*).

- Trafo pengukuran tegangan (*Potensial Transformer*) menurunkan dari tegangan menengah atau tegangan tinggi menjadi tegangan pengukuran, misalnya 20KV/100V.
- Trafo pengukuran arus (*Current Transformer*) menurunkan dari arus yang besar menjadi arus pengukuran, misalnya 400A/5A.
- Transformator 3 phasa digunakan untuk sistem listrik berdaya besar, baik pada sistem pembangkitan, transmisi maupun distribusi.
- Trafo 3 phasa memiliki enam belitan. Tiga belitan primer dan tiga belitan sekunder.
- Ada dua metoda hubungan belitan primer dan belitan sekunder, yaitu hubungan **Delta** (*segitiga*), belitan sekunder **Y** (*bintang*).
- Hubungan transformator 3 phasa antara tegangan primer dan tegangan sekunder perbedaan phasa dapat diatur dengan metoda aturan hubungan jam belitan trafo, contoh : Hubungan Dy5.
- Belitan trafo 3 phasa Dy5, menunjukkan belitan primer dalam hubungan **Delta** (*segitiga*), belitan sekunder **Y** (*bintang*), beda phasa antara tegangan primer- sekunder $5 \times 30^\circ = 150^\circ$.
- Disamping hubungan bintang dan segitiga dikenal juga hubungan segitiga terbuka (*open delta- VV connection*) dan hubungan *Zig-zag*.
- Untuk mendinginkan trafo dipakai minyak trafo yang berfungsi sebagai isolasi antara belitan primer dan sekunder.
- Paralel dua transformator dilakukan dengan cara menyambungkan secara paralel dua transformator. Syarat paralel: tegangan harus sama, daya trafo mendekati sama, impedansi trafo sama.

4.26. Soal-soal

1. Daya listrik 4 MW disalurkan sejauh 100 Km dengan tegangan 220 V, faktor kerja $\cos\phi = 1$. Hitung a) besarnya arus yang mengalir, b) jika drop tegangan yang diijinkan 10%. Hitunglah penampang kawat penghantar yang dipakai.
2. Daya listrik 4 MW disalurkan sejauh 100 Km dengan tegangan 150KV faktor kerja $\cos\phi = 1$ a) hitunglah besarnya arus yang lewat penghantar. b) hitung penampang kawat jika drop tegangan 10%.

3. Trafo 200 Watt, memiliki tegangan primer 220 V dan tegangan sekunder 20 V. Jika jumlah belitan primer 1000 lilitan. Hitunglah a) jumlah belitan sekunder. b) hitung besarnya arus primer dan arus sekunder.
4. Gambarkan pengawatan dan hubungan alat ukur, serta jelaskan urutan proses pengujian: a) trafo tanpa beban b) trafo hubung singkat.
5. Gambarkan bentuk gelombang sinusoida dari tegangan primer trafo, arus magnetisasi dan tegangan sekunder transformator.
6. Gambarkan rangkaian pengganti trafo, yang terdiri atas komponen resistansi R dan induktansi X_L serta beban.
7. Trafo berdaya kecil 450 VA; $\cos \phi = 0,7$; rugi inti 50 Watt dan rugi tembaga 75 Watt. Hitung efisiensi trafo.
8. Transformator 3 phasa memiliki data nameplate belitan trafo Dy5. Jelaskan makna dari kode tersebut.
9. Trafo distribusi dilengkapi dengan alat relay Buchholz, gambarkan skematik alat tersebut dan cara kerjanya alat tersebut.
10. Dua buah trafo 20 KVA tegangan 20KV/400 V dihubungkan segitiga terbuka terhubung dengan sistem 3 phasa. Gambarkan hubungan kedua trafo tersebut dan berapa daya yang dihasilkan dari gabungan dua trafo tersebut.
11. Trafo distribusi untuk supply daerah perumahan dipakai hubungan **Yzn5**. Gambarkan hubungan belitan primer dan sekunder, dan jelaskan ketika terjadi beban tidak seimbang pada salah satu phasanya.
12. Ada tiga tapping sesuai *nameplate*, yaitu pada tegangan 20.800 V, tegangan 20.000 V dan tegangan 19.200 V. Jelaskan cara kerja tapping dan mengapa tapping dilakukan pada trafo distribusi.
13. Dua buah trafo distribusi 3 phasa akan dihubungkan paralel, sebutkan syarat agar kedua trafo dapat diparalelkan dan jelaskan prosedur paralel dengan menggunakan gambar pengawatan kedua trafo tsb.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 A R Bean, Lighting Fittings Performance and Design, Pergamou Press, Braunschweig, 1968
- 2 A.R. van C. Warrington, Protective Relays, 3rd Edition, Chapman and Hall, 1977
- 3 A. Daschler, Elektrotechnik, Verlag – AG, Aaraw, 1982
- 4 A.S. Pabla, Sistem Distribusi Daya Listrik, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1994
- 5 Abdul Kadir, Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik, Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta, 2000
- 6 Abdul Kadir, Pengantar Teknik Tenaga Listrik, LP3ES, 1993
- 7 Aly S. Dadras, Electrical Systems for Architects, McGraw-Hill, USA, 1995
- 8 Badan Standarisasi Nasional SNI 04-0225-2000, Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000, Yayasan PUIL, Jakarta, 2000
- 9 Bambang, Soepatah., Soeparno, Reparasi Listrik 1, DEPDIKBUD Dikmenjur, 1980.
- 10 Benyamin Stein cs, Mechanical and Electrical Equipment for Buildings, 7th Edition Volume II, John Wiley & Sons, Canada, 1986
- 11 Bernhard Boehle cs, Switchgear Manual 8th edition, 1988
- 12 Brian Scaddam, The IEE Wiring Regulations Explained and Illustrated, 2nd Edition, Clags Ltd., England, 1994
- 13 Brian Scaddan, Instalasi Listrik Rumah Tangga, Penerbit Erlangga, 2003
- 14 By Terrell Croft cs, American Electrician's Handbook, 9th Edition, McGraw-Hill, USA, 1970
- 15 Catalog, Armatur dan Komponen, Philips, 1996
- 16 Catalog, Philips Lighting.
- 17 Catalog, Sprecher+Schuh Verkauf AG Auswahl, Schweiz, 1990
- 18 Cathey, Jimmie .J, Electrical Machines : Analysis and Design Applying Matlab, McGraw-Hill, Singapore,2001
- 19 Chang,T.C,Dr, Programmable Logic Controller,School of Industrial Engineering Purdue University
- 20 Diesel Emergensi, Materi kursus Teknisi Turbin/Mesin PLTA Modul II, PT PLN Jasa Pendidikan dan Pelatihan, Jakarta 1995.
- 21 E. Philippow, Taschenbuch Elektrotechnik, VEB Verlag Technik, Berlin, 1968
- 22 Edwin B. Kurtz, The Lineman's and Cableman's Handbook, 7th Edition, R. R. Dournelley & Sons, USA, 1986
- 23 Eko Putra,Agfianto, PLC Konsep Pemrograman dan Aplikasi (Omron CPM1A /CPM2A dan ZEN Programmable Relay). Gava Media : Yogyakarta,2004

- 24 Ernst Hornemann cs, Electrical Power Engineering proficiency Course, GTZ GmbH, Braunschweigh, 1983
- 25 F. Suyatmo, Teknik Listrik Instalasi Penerangan, Rineka Cipta, 2004
- 26 Friedrich, "Tabellenbuch Elektrotechnik Elektronik" Umuler-Boum, 1998
- 27 G. Lamulen, Fachkunde Mechatronik, Verlag Europa-Lehrmittel, Nourenweg, Vollmer GmbH & Co.kc, 2005
- 28 George Mc Pherson, An Introduction to Electrical Machines and Transformers, John Wiley & Sons, New York, 1981
- 29 Graham Dixon, Electrical Appliances (Haynes for home DIY), 2000
- 30 Gregor Haberk, Etall, Tabelleubuch Elektroteknik, Verlag, GmbH, Berlin, 1992
- 31 Gunter G.Seip, Electrical Installation Hand Book, Third Edition, John Wiley & sons, Verlag, 2000
- 32 H. R. Ris, Electrotechnik Fur Praktiker, AT Verlag Aarau, 1990.
- 33 H. Wayne Beoty, Electrical Engineering Materials Reference Guide, McGraw-Hill, USA, 1990
- 34 Haberle Heinz, Etall, Fachkunde Elektrotechnik, Verlag Europa – Lehr Mittel, Nourwey, Vollmer, GmbH, 1986
- 35 Haberle, Heinz, Tabellenbuch Elektrotechnik, Ferlag Europa-Lehrmittel, 1992
- 37 Iman Sugandi Cs, Panduan Instalasi Listrik, Gagasan Usaha Penunjang Tenaga Listrik - Copper Development Centre South East Asia, 2001.
- 38 Instruksi Kerja Pengujian Rele, Pengoperasian Emergency Diesel Generator, PT. Indonesia Power UBP. Saguling.
- 39 J. B. Gupta, Utilization of Electric Power and Electric Traction, 4th Edition, Jullundur City, 1978
- 40 Jerome F. Mueller, P.E, Standard Application of Electrical Details, McGraw-Hill, USA, 1984
- 42 John E. Traister and Ronald T. Murray, Commercial Electrical Wiring, 2000.
- 43 Kadir, Abdul, *Transformator*, PT Elex Media Komputindo, Jakarta, 1989.
- 44 Karyanto, E., Panduan Reparasi Mesin Diesel. Penerbit Pedoman Ilmu Jaya, Jakarta, 2000.
- 45 Klaus Tkotz, Fachkunde Electrotechnik, Verlag Europa – Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. kG., 2006
- 46 L.A. Bryan, E.A. Bryan, *Programmable Controllers Theory and Implementation*, Second Edition, Industrial Text Company, United States of America, 1997
- 47 M. L. Gupta, Workshop Practice in Electrical Engineering, 6th Edition, Metropolitan Book, New Delhi, 1984
- 48 Michael Neidle, Electrical Installation Technology, 3rd edition, dalam bahasa

- Indonesia penerbit Erlangga, 1999
- 49 Nasar,S.A, Electromechanics and Electric Machines, John Wiley and Sons, Canada, 1983.
 - 50 P.C.SEN, Principles of Electric Machines and Power Electronics, Canada, 1989.
 - 51 P. Van Harten, Ir. E. Setiawan, Instalasi Listrik Arus Kuat 2, Trimitra Mandiri, Februari 2002.
 - 52 Peter Hasse Overvoltage Protection of Low Voltage System, 2nd, Verlag GmbH, Koln, 1998
 - 53 Petruzzella, Frank D, Industrial Electronics, Glencoe/McGraw-Hill,1996.
 - 54 PT PLN JASDIKLAT, Generator. PT PLN Persero. Jakarta,1997.
 - 55 PT PLN JASDIKLAT, Pengoperasian Mesin Diesel. PT PLN Persero. Jakarta, 1997.
 - 56 R.W. Van Hoek, Teknik Elektro untuk Ahli bangunan Mesin, Bina Cipta, 1980
 - 57 Rob Lutes, etal, Home Repair Handbook, 1999
 - 58 Robert W. Wood, Troubleshooting and Repairing Small Home Appliances, 1988
 - 59 Rosenberg, Robert, Electric Motor Repair, Holt-Saunders International Edition, New York, 1970.
 - 60 Saptono Istiawan S.K., Ruang artistik dengan Pencahayaan, Griya Kreasi, 2006
 - 61 SNI, Konversi Energi Selubung bangunan pada Bangunan Gedung, BSN, 2000
 - 62 Soedhana Sapiie dan Osamu Nishino, Pengukuran dan Alat-alat Ukur Listrik, Pradya Paramita, 2000
 - 63 Soelaiman,TM & Mabuchi Magarisawa, Mesin Tak Serempak dalam Praktek, PT Pradnya Paramita, Jakarta,1984
 - 64 Sofian Yahya, Diktat Programmable Logic Controller (PLC), Politeknik Negeri Bandung, 1998.
 - 65 Sumanto, Mesin Arus Searah, Penerbit Andi Offset, Yogyakarta, 1995.
 - 66 Theraja, B.L, A Text Book of Electrical Tectnology, Nirja, New Delhi, 1988.
 - 67 Thomas E. Kissell, Modern Industrial / Electrical Motor Controls, Pretience Hall, New Jersey, 1990

Simbol-simbol Gambar Listrik

a.Lambang Huruf Untuk Instrumen Ukur

Lambang Huruf Untuk Instrumen Ukur

No.	Lambang	Keterangan
1	A	ampere
2	V	volt
3	VA	voltampere
4	Var	var
5	W	watt
6	Wh	watt-jam
7	Vah	voltampere-jam
8	varh	var-jam
9	Ω	ohm
10	Hz	hertz
11	h	jam
12	min	menit
13	s	detik
14	n	Jumlah putaran premenit
15	$\cos\phi$	faktor daya
16	ϕ	sudut fase
17	λ	panjang gelombang
18	f	frekuensi
19	t	waktu
20	t°	suhu
21	z	impedans

Awal Pada Satuan SI

No.	Lambang	Keterangan
1	T	tera = 10^{12}
2	G	giga = 10^9
3	M	mega = 10^6
4	K	kilo = 10^3
5	m	mini = 10^{-3}
6	μ	mikro = 10^{-6}
7	n	nano = 10^{-9}
8	p	piko = 10^{-12}

Contoh Penggunaan Awalan Pada Satuan SI

No.	Lambang	Keterangan	
1	TΩ	1 teraohm	= 10^{12} ohm
2	GW	1 gigawatt	= 10^9 W
3	MW	1 megawatt	= 10^6 W
4	kW	1 kilowatt	= 10^3 W
5	mV	1 milivolt	= 10^3 V
6	μA	1 mikroampere	= 10^6 A
7	nF	1 nanofarad	= 10^9 farad
8	pF	1 pikofarad	= 10^{12} farad

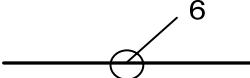
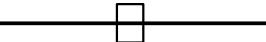
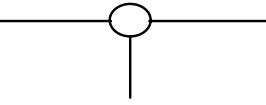
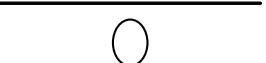
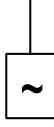
b. Lambang Gambar Untuk Diagram

Lambang Gambar Untuk Diagram Saluran Arus Kuat

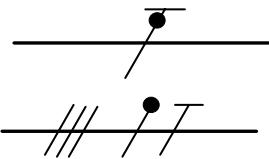
No	Lambang	keterangan
1	— atau — —	Arus searah Catatan : Tegangan dapat ditunjukkan di sebelah kanan lambang dan jenis sistem di sebelah kiri.
2	2M — 220/110V	Contoh : Arus searah, tiga penghantar termasuk kawat tengah, 220V (110V antara setiap penghantar sisi dan kawat tengah). 2 M dapat diganti dengan 2 + M.
3	~	Arus bolak-balik Catatan : a) Nilai frekuensi dapat ditambahkan di sebelah kanan lambang. b) Tegangan dapat juga ditunjukkan di sebelah kanan lambang. c) Jumlah fase dan adanya netral dapat ditunjukkan sebelah kiri lambang.
4	~ 50 Hz	Contoh : Arus bolak balik, 50 Hz.
5	3 N~ 50Hz 400/230 V	Arus bolak balik, fase tiga, dengan netral, 50Hz, 400V (230V tegangan antara fase dengan netral) 3N dapat diganti dengan 3 + N.

No	Lambang	keterangan
6	3 N~ 50Hz / TN-S	Arus bolak-balik, fase tiga, 50Hz sistem mempunyai satu titik dibumikan langsung dan netral serta penghantar pengaman terpisah sepanjang jaringan.
7	—	Penghantar Kelompok Penghantar Saluran Kabel Sirkit
8	— // —	Catatan : a) Jika sebuah garis melambangkan sekelompok penghantar, maka jumlah penghantarnya ditunjukkan dengan menambah garis-garis pendekatau dengan satu garis pendek dan sebuah bilangan. Contoh : Tiga Penghantar (No.8 dan No.9)
9	— / — ³	b) Penjelasan tambahan dapat ditunjukkan sebagai berikut : 1) di atas garis: jenis arus, sistem distribusi, frekuensi dan tegangan. 2) Di bawah garis: jumlah penghantar sirkit diikuti dengan tanda kali dan luas penampang setiap penghantar. Contoh : Sirkit arus searah, 110V, dua penhantar alumunium ver penampang 120 mm ² .
10	— 110 V — 2 x 50 mm ² A1	Sirkit arus searah, 220V (antara penghantar sisi dan kawat tengah 110V), dua penghantar sisi berpenampang 50 mm ² dan kawat tengah 25 mm ² .
11	2 N— 220 V — 2 x 50 mm ² + 1 x 25 mm ²	Sirkit fase tiga, 50Hz, 400 V, tiga penghantar berpenampang 120 mm ² , dengan netral berpenampang 50 mm ² .
12	3 N ~ 50 Hz 400 V — — 3 x 120 mm ² + 1 x 50 mm ²	

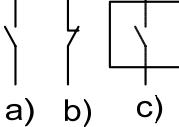
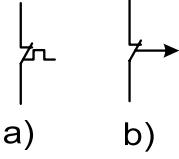
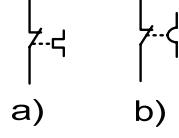
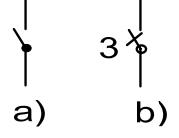
No	Lambang	keterangan
13		Penghantar fleksibel
14		Penghantar pilin diperlihatkan dua penghantar.
15		Penghantar dalam suatu kabel : a) Tiga penghantar dalam suatu kabel. b) Dua dari lima penghantar dalam suatu kabel.
16	(a)	a) Ujung penghantar atau kabel tidak dihubungkan.
	(b)	b) Ujung penghantar atau kabel tidak dihubungkan dan diisolasi khusus.
17		a) Percabangan penghantar. b) Dua percabangan penghantar
18		Saluran bawah tanah
19		Saluran dalam laut.
20		Saluran udara.

No	Lambang	keterangan
21	 	<p>Saluran dalam jalur atau pipa.</p> <p>Catatan :</p> <p>Jumlah pipa, luas penampang dan keterangan lainnya dapat diperlihatkan di atas saluran yang menggambarkan lintas pipa.</p> <p>Contoh :</p> <p>Saluran dalam jalur dengan enam jurusan</p>
22		Saluran masuk orang (manhole)
23		Saluran dengan titik sambung/hubung tertanam.
24		Saluran dengan penahan gas atau minyak
25		Titik sadap pada saluran sebagai penyulang konsumen.
26		Sadap sistem
27		Sadapan hubung seri
28		Unit daya saluran, yang diperlihatkan jenis arus bolak balik.

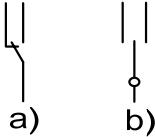
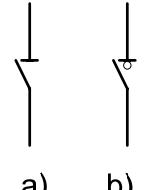
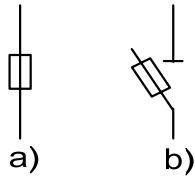
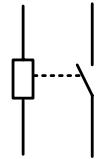
No	Lambang	keterangan
29		Penahan daya pada penyulang distribusi.
30		Titik injeksi penyulang daya.
31	(a) (b)	Kotak ujung kabel; mof ujung a) satu kabel berinti tiga b) tiga kabel berinti satu
32	(a) (b)	Kotak sambung lurus, mof sambung lurus, tiga penghantar. a) Dinyatakan dengan garis ganda. b) Dinyatakan dengan garis tunggal.
33		Kotak sambung cabang tiga.
34		Kotak sambung cabang empat.
35		Penghantar netral
36		Penghantar pengaman

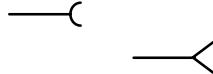
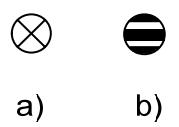
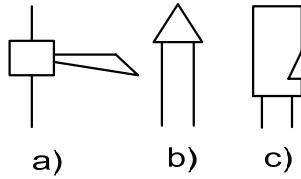
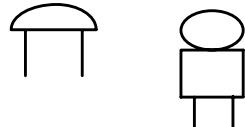
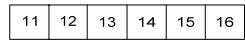
No	Lambang	keterangan
37		<p>Penghantar pengaman dan penghantar netral di gabung</p> <p>Contoh: Saluran fase tiga dengan penghantar pengaman dan penghantar netral</p>

c. Lambang Gambar Untuk Diagram Instalasi Pusat dan Gardu Listrik

No.	Lambang	Keterangan
1		<p>a) Sakelar penghubung b) Sakelar pemutus c) Sakelar berselungkup; saklar bersekat pelindung</p>
2		<p>Sakelar dengan pemutusan : a) Secara termis b) Secara elektromagnetis</p>
3		<p>Sakelar dengan pelayanan a) Relai termal b) Relai elektromagnetik</p>
4		<p>a) Sakelar, lambang umum b) Sakelar kutub tiga</p>

No.	Lambang	Keterangan
5		a) Sakelar pengubah aliran

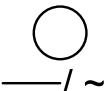
No.	Lambang	Keterangan
	 a) b)	b) Sakelar pengubah aliran dengan kedudukan netral
6		Pemutus sirkit / CB (Circuit Breaker)
7	 a) b)	Pemisah DS (Disconnecting Switch)
8		Pemutus daya LBS (Load Break Switch)
9		NFB (No Fuse Beaker) CB yang tak berwujud fuse
10	 a) b)	a) Pengaman lebur b) Sakelar pemisah dengan pengaman lebur
11		Pengaman lebur dengan sirkit alarm terpisah
12		Kotak kontak

No.	Lambang	Keterangan
		
13		Tusuk Kontak
14		Kontak tusuk
15	 a) b)	a) Lampu; lambang umum lampu isyarat b) Lampu kedip; indikator
16	 a) b) c)	a) Klakson b) Sirene c) Peluit yang bekerja secara listrik
17		Bel
18		Pendengung
19		Jalur terminal; blok terminal
20		Perangkat hubung bagi dan kendali
21		Bumi; pembumian

No.	Lambang	Keterangan
22		Hubungan rangka atau badan
23		Pembumian rangka
24		Penyekatan atau dielektrik
25		Sekat pelindung; selungkup Catatan - Penjelasan macam selungkup dapat ditambahkan dengan catatan atau dengan lambang kimiawi logam
26		Garis batas; garis pemisah; sumbu
27	 a) b)	a) Generator - G b) Motor - M
28		Transformator
29		Auto transformator satu fase
30		Sel atau akumulator

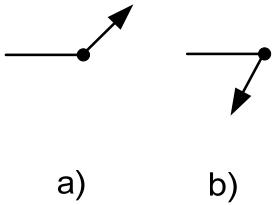
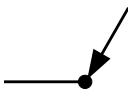
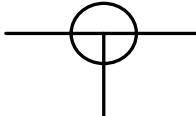
No.	Lambang	Keterangan
31		Baterai sel atau baterai akumulator
32	 a) b) c)	Lambang umum dari : a) Instrumen penunjuk langsung atau pesawat ukur b) Instrumen pencatat c) Instrumen penjumlah Contoh : a) Voltmeter b) Wattmeter c) Wh-meter d) (lihat Bagian 2.8.1)
33		Pusat tenaga listrik
34		Gardu listrik
35		Pusat listrik tenaga air
36		Pusat listrik tenaga termal (batubara, minyak bumi, gas,dsb)
37		Pusat tenaga nuklir

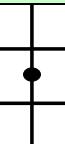
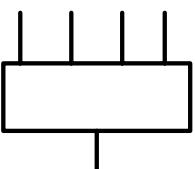
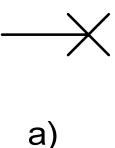
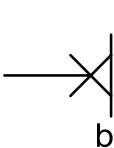
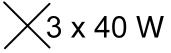
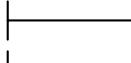
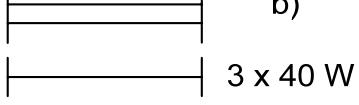
No.	Lambang	Keterangan
-----	---------	------------

38		Pusat listrik panas bumi
39		Pusat listrik tenaga matahari
40		Pusat listrik tenaga angin
41		Pusat listrik plasma MHD (<i>magneto-hydrodynamic</i>)
42		Gardu listrik konversi arus searah ke a.b.b

d. Lambang Gambar untuk Diagram Instalasi Bangunan

No.	Lambang	Keterangan
1		Pengawatan (lambang) Catatan - Untuk maksud tertentu, "garis" dapat diganti dengan "garis putus-putus"
2		Pengawatan tampak (di permukaan)
3		Pengawatan tidak tampak (di bawah permukaan)
4		Pengawatan dalam pipa

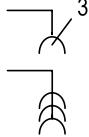
No.	Lambang	Keterangan
		Catatan-Jenis pipa dapat diyatakan, jika perlu
5	 a) b)	a) Pengawatan menuju keatas b) Pengawatan menuju ke bawah Catatan: Lambang 5 & 6 1) pernyataan "ke atas" dan "ke bawah" hanya berlaku jika gambar dibaca dalam posisi yang benar 2) Panah pada garis miring menyatakan arah aliran daya 3) Pengawatan berpangkal pada lingkaran atau titik hitam
6		Pengawatan melalui ruangan secara tegak lurus
7		Kotak, lambang umum
8		Saluran dari bawah
9		Saluran dari atas
10		Kotak sambung atau kotak hubung
11		Kotak cabang tiga
12		Kotak-saluran masuk utama

No.	Lambang	Keterangan
		
13		Perangkat hubung bagi dan kendali dengan lima pipa
14	  a) b)	a) Lampu; titik sadap lampu dengan pengawatannya b) Lampu dipasang tetap pada dinding dengan pengawatannya
15		Kelompok dari tiga buah lampu 40 W
16		Perangkat lampu dengan saklar sendiri
17	 a)  b)	a) Lampu darurat b) Armatur penerangan darurat
18	 a)  b) 3 x 40 W	a) Lampu floresen, lambang umum b) Kelompok dari tiga buah lampu floresen 40 W

No.	Lambang	Keterangan
19		Proyektor, lambang umum
20		Lampu sorot
21		Lampu sebar
22		Lengkapan tambahan untuk lampu luah Catatan : Hanya digunakan jika lengkapan tambahan tidak termasuk dalam armatur penerangan
23		Peranti listrik Catatan-jika perlu untuk lebih jelas dapat diberikan nama
24	 	Alat pemanas listrik Pemanas air listrik
25		Kipas dengan pengawatannya
26		Jam hadir (temi clock)
27		Kunci listrik
28		Instrumen interkom

No.	Lambang	Keterangan
29		Sakelar, lambang umum
30		Sakelar dengan lampu pandu
31		Sakelar pembatas waktu, kutub tunggal
32	 a) b) c)	Sakelar satu arah a) Kutub tunggal b) Kutub dua c) Kutub tiga
33	 a) b)	a) Sakelar tarik kutub tunggal b) Fungsi dari sakelar 30 a) dan 31a)
34	 a) b)	a) Sakelar dengan posisi ganda untuk bermacam-macam tingkat penerangan b) Fungsi dari sakelar a)
35	 a) b)	a) Sakelar kelompok b) Fungsi dari saklar

No.	Lambang	Keterangan
36	<p>a) b)</p>	<p>a) Sakelar dua arah b) Fungsi dari dua buah sakelar a) yang digabung</p>
37		<p>a) Sakelar Silang b) Fungsi dari sakelar a)</p>
38		Sakelar dim
39		Tombol tekan
40		Tombol tekan dengan lampu indikator
41		Tombol tekan dengan pencapaian terbatas (tertutup gelas, dsb)
42		Perlengkapan pembatas waktu
43		Sakelar waktu
44		Sakelar berkunci gawai sistem jaga

No.	Lambang	Keterangan
45		Kotak kontak
46		Kotak kontak ganda, misalnya untuk 3 buah tusuk kontak
47		Kotak kontak dengan kontak pengaman, misalnya kontak pembumian
48		Kotak kontak bertutup
49		Kotak kontak dengan sakelar tunggal
50		Kotak kontak dengan sakelar interlok
51		Kotak kontak dengan transformator pemisah misalnya untuk alat cukur
52		Kotak kontak untuk peranti elektronik misalnya untuk telepon, teleks dan sebagainya.

e. Nomenklatur Kabel

Code	Arti	Contoh
A	Selubung atau lapisan perlindungan luar bahan serat (misalnya goni/jute)	NKRA, NAKBA
AA	Selubung atau lapisan perlindungan luar dua lapis dari bahan serat (jute)	NAHKZAA,NKZAA

Code	Arti	Contoh
B	Perisai dari pita baja ganda	NYBY, NEKBA
	Selubung dari timah hitam	NYBUY
C	Penghantar konsentris tembaga	NYCY
	Selubung penghantar dibawah selubung luar	NHSSHCou
CE	Penghantar konsentris pada masing-masing inti, dalam hal kabel berinti banyak	NYCEY
CW	Penghantar konsentris pada masing-masing inti, yang dipasang secara berlawanan arah untuk kabel tegangan nominal 0,6/1 kV (1,2 kV)	NYCWY
D	Spiral anti tekanan	
	Pita penguat non-magnetis	
E	Kabel dengan masing-masing intinya berselubung logam	NEKBA
F	Perisai Kawat Baja pipih	NYFGBbY
G	Spiral dari kawat baja pipih	NYKRG
G	Isolasi karet/EPR	NGA
	Selubung isolasi dari karet	NGG
2G	Isolasi karet butil dengan daya tahan lebih tinggi terhadap panas	N2GAU
Gb	Spiral pita baja (mengikuti F atau R)	NYRGBbY, N2XSEYFGbY
H	Lapisan penghantar diatas isolasi, untuk membatasi medan listrik	NHKBA, NHKRA
K	Selubung timbal	NKBA, NAKBY
KL	Selubung alumunium	NKLY, NAHKLY
KWK	Selubung dari pita tembaga yang terpasang dan dilas memanjang	NWKZY

Code	Arti	Contoh
L	Perisai dari jalinan-kawat-baja-bulat (braid)	NTRLA
MK	Kabel dengan selubung timah hitam untuk pemasangan dalam kapal laut	MK
N	Kabel standar penghantar tembaga	NYA, NYY
NA	Kabel standar penghantar alumunium	NAYFGbY, NAKBA
NF	Kabel udara berisolasi dipilin	NF2X, NFAY
NI	Kabel bertekanan gas	NIKLDEY
NO	Kabel bertekanan minyak	NOKDEFOA
NP	Kabel dalam pipa bertekanan gas	NPKDvFSt2Y
O	Perisai-terbuka dari kawat-kawat baja	NKROA
	Kabel berpenampang oval	NYM-O
	Kabel tanpa inti berwarna hijau kuning	NYFGbY-O
Q	Jalinan (brid) dari kawat-kawat baja berselubung-seng	NYKQ
R	Perisai dari kawat-kawat baja bulat	NYRGbY
RR	Dua lapisan perisai dari kawat-kawat baja bulat	NKRRGbY
S	- perisai dari tembaga - pelindung listrik dari pita tembaga yang dibulatkan pada semua inti kabel bersama-sama	N2XSY
SE	Pelindung listrik dari pita tembaga yang menyelubungi masing-masing inti kabel	N2XSEY
T	Tali penggantung dari baja	
2X	Selubung isolasi dari XLPE	NF2X, N2XSY
Y	Selubung isolasi dari PVC	NYA
2Y	Selubung isolasi dari polythylene	

Code	Arti	Contoh
Z	Perisai dari kawat-kawat baja yang masing-masing mempunyai bentuk "Z"	NKZAA
Z	Penghantar ber isolasi dengan beban-tarik	NYMZ
	Selubung logam dari pita seng	NYRUZY

DAFTAR GAMBAR

Bab 1. Pengetahuan Listrik Dasar

1.1	Sifat muatan listrik	1-2
1.2	Fenomena elektrostatis	1-2
1.3	Batang plastik yang bermuatan sama saling tolak menolak	1-2
1.4	Batang kaca dan batang plastik yang berbeda muatannya saling tarik menarik.....	1-2
1.5	Generator elektrostatis Van de Graff	1-3
1.6	Model visual tegangan	1-4
1.7	Sumber tegangan DC Power suply	1-5
1.8	Simbol dan fisik Voltmeter.....	1-6
1.9a	Mengukur tegangan	1-6
1.9b	Voltmeter diujung-ujung beban	1-7
1.10	Arus listrik mengalir ke beban	1-7
1.11	Atom terdiri atas proton dan elektron	1-8
1.12	Aliran listrik merupakan aliran elektron	1-8
1.13	Ampermeter	1-9
1.14	Mengukur arus dengan Ampermeter	1-9
1.15	Kerapatan arus pada penghantar	1-9
1.16	Kurva rapat arus fungsi luas penampang	1-10
1.17	Kumpulan atom membentuk material	1-11
1.18	Kurva konduktansi fungsi tahanan R	1-11
1.19	Rangkaian hukum Ohm	1-12
1.20a	Kurva arus fungsi tegangan	1-12
1.20b	Kurva arus fungsi tahanan	1-13
1.22	Seri Resistor dengan sumber DC	1-16
1.23	Paralel beban dengan sumber DC	1-17
1.24	Aplikasi hukum Kirchhoff tegangan.....	1-18
1.25	Rangkaian pembagi tegangan	1-19
1.26	Hukum Kirchoff-arus	1-19
1.27	Pengukuran tahanan nilai R kecil.....	1-21
1.28	Pengukuran tahanan nilai R besar.....	1-21
1.29	Pengukuran tahanan dalam baterai	1-21
1.30	Karakteristik tegangan fungsi arus.....	1-22
1.31	Karakteristik daya fungsi arus	1-22
1.32	Rangkaian ekivalen sumber tegangan.....	1-23
1.33	Rangkaian ekivalen sumber arus	1-23
1.34	Karakteristik daya terhadap perubahan tahanan	1-23
1.35	Rangkaian tahanan a) sebenarnya b) disederhanakan c) hasil akhir	1-24
1.36	Rangkaian Tahanan disederhanakan	1-26
1.37	Hubungan Segitiga dan hub bintang	1-27
1-38	Baterai terhubung seri dengan Beban Ra.....	1-29

Bab 2. Kemagnetan dan Elektromagnetis

2.1	Sifat magnet saling tarik menarik, tolak-menolak	2-2
2.2	Kutub utara-selatan magnet permanen.....	2-2
2.3	Daerah netral pada magnet permanen.....	2-2
2.4	Perbedaan besi biasa dan magnet permanen.....	2-3
2.5	Pola garis medan magnet permanen	2-3
2.6	Garis medan magnet utara-selatan	2-3
2.7	Pola garis medan magnet tolak menolak dan tarik menarik	2-4
2.8	Garis gaya magnet pada permukaan rata dan silinder.....	2-4
2.9	Prinsip elektromagnetik	2-4
2.10	Garis magnet membentuk selubung seputar kawat berarus	2-5
2.11	Prinsip putaran sekrup.....	2-5
2.12	Elektromagnetik sekeliling kawat.....	2-5
2.13	Kawat melingkar berarus membentuk kutub magnet	2-6
2.14	Belitan kawat membentuk kutub magnet.....	2-6
2.15	Hukum tangan kanan	2-6
2.16	Belitan kawat berinti udara	2-7
2.17	Daerah pengaruh medan magnet.....	2-7
2.18	Medan magnet pada toroida.....	2-8
2.19	Kerapatan fluk magnet	2-9
2.20	Bahan ferromagneik	2-10
2.21	Kurva BH inti udara	2-10
2.22	Kurva BH ferromagnetik	2-11
2.23	Kurva magnetisasi	2-12
2.24	Kurva histerisis	2-13
2.25	Histerisis magnet permanen-ferromagnetik.....	2-13
2.26	Rangkaian magnetik.....	2-14
2.27	Prinsip dasar motor DC	2-16
2.28	Prinsip timbulnya torsi motor DC	2-16
2.29	Torsi F motor DC	2-17
2.30	Prinsip tangan kiri Flemming	2-17
2.31	Model uji gaya tolak.....	2-18
2.32	Prinsip alat ukur listrik.....	2-18
2.33	Prinsip torsi pada kawat berarus	2-19
2.34	Prinsip generator	2-19
2.35	Prinsip hukum Lorentz.....	2-20
2.36	Prinsip tangan kanan Flemming	2-20
2.37	Interaksi elektromagnetik.....	2-20
2.38	Prinsip induksi elektromagnetik	2-21
2.39	Gelombang belitan primer dan belitan sekunder.....	2-21
2.40	Induksi pada cincin	2-22

Bab 3. Dasar Listrik Arus Bolak Balik

3.1	Prinsip pembangkitan Listrik AC	3-1
3.2	Generator AC dua kutub	3-1
3.3	Generator AC empat kutub	3-1
3.4	Prinsip generator AC	3-1
3.5	Bentuk gelombang AC	3-2
3.6	Rangkaian pembangkit gelombang pulsa	3-2
3.7	Satu siklus	3-4
3.8a	Pembentukan gelombang sinusoida	3-5
3.8b	Proyeksi lingkaran ke garis kuadran	3-5
3.9	Panjang gelombang	3-6
3.10	Harga sesaat gelombang sinusoida	3-7
3.11	Prinsip harga efektif gelombang sinusoida	3-10
3.12	Nilai puncak, nilai efektif gelombang sinusoida	3-10
3.13	Rangkaian resistor listrik AC	3-12
3.14	Kapasitor pada sumber listrik AC	3-13
3.15	Gelombang tegangan dan arus beban Kapasitor	3-14
3.16	Nilai kapsitansi fungsi frekuensi	3-14
3.17	Nilai induktansi fungsi frekuensi	3-15
3.18	Bentuk gelombang tegangan dan arus beban Induktor	3-15
3.19	3-16
3.22	Resistor seri Induktor listrik AC	3-21
3.23	Seri Resistor dengan Induktor	3-21
3.24	Vektor tegangan dengan skala	3-22
3.25	Segitiga tegangan Resistor seri Induktor	3-22
3.26	Bentuk gelombang tegangan beban Resistor dan Induktor	3-23
3.27	Segitiga daya	3-23
3.28	Segitiga impedansi	3-24
3.29	Resistor parallel Induktor	3-25
3.30	Segitiga arus	3-25
3.31	Segitiga konduktansi, suseptansi dan admitansi	3-25
3.32	Bentuk arus beban Resistor parallel Induktor	3-26
3.33	Segitiga Daya Aktif, Reaktif dan Semu	3-26
3.34	Pengukuran daya dengan wattmeter	3-27
3.35	Daya diklep beban resistif	3-27
3.36	Daya aktif beban impedansi	3-28
3.37	Daya aktif beban induktif	3-29
3.38	Pengukuran arus, tegangan, dan wattmeter	3-29
3.39	Rangkaian R Seri dan Segitiga Daya	3-30
3.40	Rangkaian R Paralel dan Segitiga Daya	3-30
3.41	Diagram Faktor Kerja	3-31
3.42	Resistor seri kapasitor	3-34
3.43	Rangkaian Resistor paralel kapasitor	3-34
3.44	Segitiga Admitansi	3-35
3.45	Segitiga Daya	3-35
3.46	Rangkaian Seri R, L, C dan Diagram Vektor Tegangan	3-36
3.47	Segitiga Impedansi Induktif dan Kapasitif	3-37

DAFTAR GAMBAR

3.48	Rangkaian Paralel R, L, C dan diagram vektor arus	3-38
3.49	Vektor Arus dan Vektor Konduktansi.....	3-40
3.50	Rangkaian Resonansi LC.....	3-40
3.51	Rangkaian Resonansi LC.....	3-41
3.52	Vektor Diagram Arus	3-42
3.53	Diagram Arus Saat Resonansi	3-42
3.54	Rangkaian Resonansi C, L.....	3-43
3.55	Penyederhanaan rangkaian	3-43
3.56	Diagram Arus Resonansi.....	3-44
3.57	Prinsip Tangan Kanan Flemming	3-45
3.58	Pembangkitan Tegangan Induksi	3-45
3.59	Prinsip Generator 3 Phasa	3-46
3.60	Rangkaian pembangkit, pengukuran dan beban bintang-segitiga ...	3-46
3.61	Tegangan Bintang dan segitiga.....	3-47
3.62	Tegangan phasa netral; tegangan phasa ke phasa	3-47
3.63	Pengukur Tegangan phasa-phasa, tegangan phasa-netral	3-48
3.64	Beban Bintang	3-48
3.65	Gelombang Sinusoida 3 phasa	3-49
3.66	Diagram Vektor Tegangan dan Arus 3 phasa	3-49
3.67	Vektor Tegangan dan Arus beban Resistif tidak seimbang.....	3-49
3.68	Vektor Tegangan phasa-netral, beban tidak seimbang.....	3-50
3.69	Hubungan Segitiga	3-50
3.70	Vektor Arus Segitiga.....	3-50
3.71	Vektor Arus phasa dengan arus jala-jala.....	3-51
3.72	Terminal Motor Hubung Singkat.....	3-51
3.73	Terminal Motor Hubung Singkat.....	3-51
3.74	Beban Bintang dan Segitiga	3-52
3.75	Prinsip Wattmeter	3-53
3.76	Pengukuran Daya dengan satu wattmeter	3-54
3.77	Pengukuran Daya dengan Trafo Arus (CT).....	3-54
3.78	Pengukuran Daya dengan dua wattmeter	3-54
3.79	Lampu TL dengan kompensasi kapasitor.....	3-55
3.80	Segitiga Daya Kompensasi	3-55
3.81	Aliran Daya Reaktif Sebelum dan Sesudah Kompensasi.....	3-56
3.82	Rangkaian Kompensasi Paralel dan Kompensasi Seri	3-56
3.83	Kompensasi Grup.....	3-57
3.84	Kompensasi Sentral	3-57
3.85	Kompensasi Parelel & Kompensasi Seri Beban Satu Phasa	3-58

Bab 4. Transformator

4.1	Peta Jenis-jenis Mesin Listrik	4-2
4.2	Prinsip kerja Transformator Satu Phasa.....	4-3
4.3	Nameplate Trafo Satu Phasa	4-4
4.4	Trafo satu phasa jenis Core	4-4
4.5	Bentuk Tegangan Input, Arus Magnetisasi dan Tegangan Output Trafo	4-6
4.6	Vektor Arus Magnetisasi.....	4-6

4.7	Belitan primer dan sekunder Trafo Satu Phasa	4-7
4.8	Bentuk Inti Trafo tipe E-I,L, M dan tipe UI	4-7
4.9	Inti Trafo tipe EI satu Phasa.....	4-8
4.10	Susunan belitan primer dan sekunder	4-8
4.11	Inti Trafo jenis pelat digulung	4-8
4.12	Rangkaian ekivalen Trafo	4-9
4.13	Grafik tegangan sekunder fungsi arus beban	4-9
4.14	Vektor tegangan a) beban induktip b) beban kapasitip.....	4-9
4.15	Pengawatan Uji Trafo a) Uji tanpa beban b) Uji hubung singkat ..	4-10
4.16	Rangkaian pengganti Trafo tanpa beban.....	4-10
4.17	Vektor tegangan dan arus pada Uji tanpa beban.....	4-11
4.18	Vektor tegangan dan arus pada Uji hubung singkat	4-11
4.19	Rangkaian pengganti Trafo sekunder dihubung singkat.....	4-12
4.20	Rangkaian pengganti Trafo dengan komponen resistansi dan induktansi	4-12
4.21	Grafik Arus Hubung Singkat Trafo Grafik Arus Hubung Singkat Trafo.....	4-12
4.22	Grafik efisiensi Transformator	4-13
4.23	Rangkaian listrik Autotransformator	4-14
4.24	Autotrafo dengan bentuk inti toroida	4-14
4.25	Prinsip Transformator khusus untuk Welding	4-15
4.26	Rangkaian Trafo Welding.....	4-15
4.27	Grafik tegangan fungsi arus, pada Trafo Welding.....	4-15
4.28	Bentuk fisik Trafo Arus (CT)	4-16
4.29	Pengukuran dengan trafo tegangan (PT).....	4-16
4.30	Name plate Trafo tegangan	4-16
4.31	Pengukuran dengan Trafo Arus	4-17
4.32	Nameplate Trafo Arus	4-17
4.33	Keterangan nameplate Trafo Arus	4-17
4.34	Aplikasi Trafo arus sebagai meter potable	4-18
4.35	Bentuk fisik Transformator tiga phasa.....	4-18
4.36	Belitan primer dan sekunder Trafo tiga phasa	4-19
4.37	Bentuk inti Trafo 3 Phasa	4-20
4.38	Trafo tiga phasa belitan primer dan sekunder hubungan Bintang ...	4-20
4.39	Trafo tiga phasa belitan primer dan sekunder hubungan Segitiga...	4-20
4.40	Vektor kelompok Jam pada Trafo 3 phasa	4-21
4.41	Relay Buchholz	4-21
4.42	Trafo 3 phasa hubungan Segitiga terbuka (hubungan VV)	4-22
4.43	Trafo tiga phasa dengan belitan primer hubungan Segitiga, belitan sekunder hubungan Bintang	4-22
4.44	Pemasangan Trafo Outdoor.....	4-23
4.45	Trafo daya (Yyn6 dan Dyn5) dengan beban asimetris.....	4-23
4.46	Trafo daya Yzn5 dan bentuk vektor tegangan sekundernya	4-24
4.47	Namplate Trafo daya tiga phasa.	4-24
4.48	Pengaturan Tapping terminal Trafo Distribusi.....	4-24
4.49	Paralel Dua Trafo satu phasa	4-25
4.50	Paralel Dua Trafo Tiga phasa	4-26

Bab 5. Motor Listrik Arus Bolak Balik

5.1	Pengukuran kecepatan dengan Tachometer	5-2
5.2	Torsi Motor	5-2
5.3	Pengujian Motor Listrik di Laboratorium	5-3
5.4	Prinsip kerja motor induksi	5-4
5.5	Belitan stator motor induksi 2 kutub	5-4
5.6	Bentuk gelombang sinusoida dan timbulnya medan putar pada stator motor induksi	5-5
5.7	Bentuk rotor sangkar	5-6
5.8	Fisik motor induksi	5-7
5.9	Rugi-rugi daya motor induksi.....	5-7
5.10	Torsi motor pada rotor dan torsi pada poros	5-8
5.11	Nameplate motor Induksi.....	5-8
5.12	Putaran motor dilihat dari sisi poros	5-9
5.13	Karakteristik Torsi motor induksi	5-9
5.14	Karakteristik putaran fungsi torsi beban	5-10
5.15	Karakteristik parameter efisiensi,putaran, faktor kerja dan arus beban.....	5-10
5.16	Pengawatan Motor Induksi Pengasutan Langsung (DOL)	5-11
5.17	Karakteristik Torsi, Pengasutan DOL	5-11
5.18	Karakteristik Arus fungsi putaran, Pengasutan DOL	5-12
5.19	Pengawatan Pengasutan Resistor Stator.....	5-12
5.20	Karakteristik Torsi Pengasutan Resistor Stator.....	5-12
5.21	Pengawatan Pengasutan Tegangan dengan Autotransformato.....	5-13
5.22	Pengawatan Pengasutan Bintang-Segitiga	5-14
5.23	Karakteristik Arus Pengasutan Bintang-Segitiga.....	5-14
5.24	Karakteristik Torsi Pengasutan Bintang-Segitiga	5-15
5.25	Pengawatan Pengasutan Soft Starting.....	5-15
5.26	Karakteristik Arus Pengasutan Soft Starting	5-15
5.27	Karakteristik Torsi Pengasutan Soft Starting.....	5-16
5.28	Bentuk fisik Motor Induksi Rotor Slipring.....	5-16
5.29	Belitan Stator dan Rotor Motor Slipring berikut Resistor pada Rangkaian Rotor.....	5-17
5.30	Nameplate Motor Induksi Jenis Slipring	5-17
5.31	Karakteristik torsi Motor Slipring	5-17
5.32	Pengawatan Motor Slipring dengan tiga tahapan Resistor	5-18
5.33	Karakteristik Torsi dengan tiga tahapan	5-18
5.34	Rangkaian Belitan Motor dua kecepatan (Dahlander).....	5-19
5.35	Hubungan Belitan Motor Dahlander	5-19
5.36	Hubungan belitan Segitiga Dahlander berkutub empat (p=2)	5-20
5.37	Hubungan belitan Bintang Ganda, berkutub dua (p=1)	5-20
5.38	Prinsip Medan Magnet Utama dan Medan magnet Bantu Motor Satu Phasa	5-20
5.39	Gelombang arus medan bantu dan arus medan utama	5-21
5.40	Medan magnet pada Stator Motor satu Phasa.....	5-21
5.41	Rotor sangkar	5-21
5.42	Bentuk fisik Motor Kapasitor.....	5-22

5.43	Pengawatan Motor Kapasitor Pembalikan Putaran	5-22
5.44	Pengawatan dengan Dua Kapasitor	5-23
5.45	Karakteristik Torsi Motor kapasitor.....	5-23
5.46	Bentuk fisik Motor Shaded Pole	5-23
5.47	Penampang Motor Shaded Pole	5-24
5.48	Komutator pada Motor Universal	5-24
5.49	Stator dan Rotor Motor Universal.....	5-24
5.50	Motor tiga Phasa disuply tegangan satu Phasa	5-25

Bab 6. Mesin Listrik Arus Searah

6.1	Stator Mesin DC dan Medan Magnet Utama dan Medan Magnet Bantu.....	6-2
6.2	Fisik Mesin DC	6-2
6.3	Penampang Komutator	6-3
6.4	Pemegang Sikat Arang	6-3
6.5	Kaidah Tangan Kanan	6-4
6.6	Model Prinsip Kerja Generator DC.....	6-4
6.7	Pembangkitan Tegangan DC pada Angker	6-5
6.8	a) Bentuk tegangan AC dan Slipring; dan b) Tegangan DC pada Komutator.....	6-5
6.9	Prinsip pembangkitan tegangan DC	6-6
6.10	Tegangan DC pada Komutator	6-6
6.11	a) Rangkaian Generator DC Penguat terpisah dan b) Penguat magnet permanen	6-7
6.12	Karakteristik tegangan Generator Penguat Terpisah.....	6-7
6.13	Rangkaian Generator Belitan Shunt	6-8
6.14	Karakteristik tegangan generator Shunt.....	6-8
6.15	Karakteristik tegangan generator Shunt.....	6-8
6.16	Karakteristik Tegangan generator komound	6-9
6.17	Bentuk Fisik Generator DC	6-9
6.18	Garis Netral Reaksi Jangkar	6-10
6.19	Garis medan Magnet jangkar.....	6-10
6.20	Pergeseran Garis Netral akibat Reaksi jangkar	6-10
6.21	Kutub Magnet Utama dan Kutub Bantu Mesin DC.....	6-11
6.22	Kutub Magnet Utama, Kutub bantu dan Belitan Kompensasi	6-11
6.23	Rangkaian belitan jangkar, belitan kutub bantu dan belitan kompensasi	6-11
6.24	Arah putaran Mesin DC.....	6-12
6.25	Mbalik arah putaran Mesin DC.....	6-12
6.26	Aturan Tangan Kiri untuk Prinsip Kerja Motor DC.....	6-13
6.27	Model kerja Motor DC	6-13
6.28	Hubungan belitan penguat medan dan Jangkar Motor DC	6-14
6.29	Proses pembangkitan Torsi Motor DC	6-14
6.30	Pengecekan sifat elektromagnetik pada Jangkar Motor DC	6-15
6.31	Starting Motor DC dengan Tahanan Depan jangkar	6-15
6.32	Karakteristik arus Pengasutan Motor DC.....	6-15

DAFTAR GAMBAR

6.33	Drop tegangan Penguat Medan Seri dan Jangkar Motor DC	6-16
6.34	Karakteristik putaran fungsi tegangan jangkar	6-16
6.35	Pengaturan tegangan Jangkar dengan sudut penyalaan Thyristor..	6-17
6.36	Karakteristik putaran fungsi arus eksitasi	6-17
6.37	Kutub bantu untuk mengatasi akibat Reaksi jangkar pada Motor DC	6-18
6.38	Karakteristik putaran Motor DC Seri.....	6-19
6.39	Rangkaian Motor DC Seri.....	6-20
6.40	Rangkaian Motor DC Penguat Terpisah.....	6-20
6.41	Karakteristik putaran Motor Penguat Terpisah.....	6-20
6.42	Rangkaian Motor DC Belitan Shunt.....	6-21
6.43	Rangkaian Motor DC Belitan Komound.....	6-21
6.44	Karakteristik putaran Motor DC Komound.....	6-22
6.45	Belitan Jangkar.....	6-22
6.46	Letak Sisi-sisi Kumparan dalam Alur Jangkar.....	6-23
6.47	Prinsip Belitan Gelung	6-24
6.48	Belitan Gelung Tunggal	6-26
6.49	Prinsip Belitan Gelombang	6-26
6.50	Belitan Gelombang Tunggal	6-28

Bab 7. Pengendalian Motor Listrik

7.1	Sistem Pengendalian terdiri rangkaian daya dan rangkaian kontrol	7-2
7.2	Dasar Sistem Pengaturan Otomatisik	7-2
7.3	Kontrol ON-OFF dengan bimetal.....	7-2
7.4	Jenis-jenis kontak	7-3
7.5	Bentuk fisik kontak diam dan kontak bergerak	7-3
7.6	Simbol dan bentuk fisik relay	7-3
7.7	Relay dikemas plastik tertutup.....	7-4
7.8	Komponen Reed Switch	7-4
7.9	Tombol tekan.....	7-4
7.10	Simbol timer dan karakteristik timer	7-5
7.11	Tampak samping irisan kontaktor.....	7-5
7.12	Simbol, kode angka dan terminal kontaktor	7-5
7.13	Bentuk fisik kontaktor	7-6
7.14	Tampak irisan Miniatur Circuit Breaker	7-6
7.15	Tampak irisan Motor Control Circuit Breaker	7-6
7.16	Fisik MCCB.....	7-7
7.17	Kontrol relay impuls	7-7
7.18	Timer OFF delay.....	7-7
7.19	Diode, Varistor dan RC sebagai pengaman relay	7-8
7.20	Koil set-reset.....	7-8
7.21	Rangkaian daya dan kontrol motor induksi	7-9
7.22	Rangkaian daya dan kontrol Direct ON Line (DOL)	7-9
7.23	Hubungan terminal a) Bintang b) Segitiga.....	7-10
7.24	Perbandingan DOL dan Bintang Segitiga.....	7-11
7.25	Pengawatan Daya Bintang - Segitiga.....	7-11
7.26	Pengawatan kontrol bintang-segitiga	7-12

7.27	Hubungan Bintang Segitiga	7-13
7.28	Nameplate motor induksi bintang segitiga	7-13
7.29	Pengawatan kontrol otomatis bintang-segitiga	7-14
7.30	Pengawatan Daya Pembalikan Putaran Motor Induksi.....	7-15
7.31	Pengawatan kontrol pembalikan putaran.....	7-16
7.32	Kontrol pembalikan motor dilengkapi lampu indikator.....	7-16
7.33	Pengawatan daya dua motor bekerja bergantian	7-17
7.34	Pengawatan kontrol dua motor bergantian	7-18
7.35	Pengaturan Selang Waktu Oleh Timer	7-18
7.36	Karakteristik a) Arus Fungsi Putaran b) Torsi Fungsi Putaran.....	7-19
7.37	Diagram Satu Garis Instalasi Pengasutan Soft Starting	7-20
7.38	Pengawatan soft starting a) DOL b) Bintang segitiga	7-20
7.39	Tata letak komponen dalam bok panel	7-21
7.40	Pengawatan a) Ampermeter Switch b) Voltmeter Switch	7-22
7.41	Pengamanan bimetal overload dan arus hubung singkat	7-22
7.42	Pemakaian Trafo Arus CT Pengamanan Motor	7-23
7.43	Pengaman under voltage	7-23
7.44	Pengaman beban lebih dengan PTC/NTC	7-23
7.45	Instalasi Pompa Air Dengan Kendali Pressure Switch.....	7-24
7.46	Instalasi Pompa Air Dengan Kendali Level Switch	7-24
7.47	Instalasi pompa air dgn kendali dua buah level switch	7-25
7.48	Instalasi pompa air dgn dua pompa	7-25
7.49	Pengawatan daya pengasutan resistor dua tahap	7-26
7.50	Pengawatan kontrol pengasutan resistor dua tahap	7-27
7.51	Pengawatan daya bintang-segitiga	7-27
7.52	Pengawatan kontrol bintang segitiga dengan timer	7-28
7.53	Pengawatan pengasutan dengan autotransformator	7-29
7.54	Pengawatan kontrol autotransformator	7-30
7.55	Pengawatan motor slipring dua tahap resistor	7-31
7.56	Pengawatan motor slipring tiga tahap resistor	7-32
7.57	Pengawatan kontrol motor slipring	7-32

Bab 8. Alat Ukur dan Pengukuran Listrik

8.1	Tampilan meter Digital	8-2
8.2	Meter listrik Analog	8-2
8.3	Penunjukan meter analog dan meter digital	8-5
8.4	Komponen alat ukur listrik analog	8-5
8.5	Dudukan poros jarum penunjuk	8-6
8.6	Pola penyimpangan jarum meter analog	8-6
8.7	Jenis skala meter analog	8-6
8.8	Multimeter analog	8-7
8.9	Tampilan penunjukan digital	8-7
8.10	Prinsip kerja alat ukur digital	8-8
8.11	Tiga jenis display digital	8-8
8.12	Multimeter digital AC dan DC	8-8
8.13	Prinsip Alat Ukur Kumparan Putar	8-9

DAFTAR GAMBAR

8.14	Meter kumparan putar dengan diode penyearah	8-9
8.15	Prinsip alat ukur besi putar	8-10
8.16	Prinsip elektrodinamik	8-10
8.17	Pemasangan wattmeter	8-11
8.18	Pengawatan wattmeter dengan beban satu phasa	8-11
8.19	Prinsip Alat ukur Piringan Putar (kWHmeter)	8-12
8.20	kWH meter	8-12
8.21	Pengawatan kWH meter satu phasa dan tiga phasa	8-13
8.22	Tahanan seri RV pada Voltmeter	8-14
8.23	Tahanan paralel ampermeter	8-14
8.24	Tahanan depan dan paralel ampermeter	8-15
8.25	Batas ukur Ampermeter	8-15
8.26	Penambahan Batas Ukur meter	8-16
8.28	Jenis-jenis Pengukuran Tahanan	8-16
8.29	Rangkaian jembatan Wheatstone	8-17
8.30	Pengembangan model Wheatstone	8-17
8.31	Bentuk fisik Osiloskop	8-18
8.32	Blok diagram sistem Osiloskop	8-19
8.33	Pancaran elektron ke layar pendar CRT	8-20
8.34	Pembagi tegangan 10 1 pada Probe	8-20
8.35	Trigerung memunculkan sinyal gigi gergaji	8-21
8.36	Blok diagram Osiloskop dua kanal	8-22
8.37	Blok diagram Osiloskop Digital	8-23
8.38	Sampling sinyal analog oleh ADC	8-23
8.39	Mengukur tegangan DC dengan Osiloskop	8-24
8.40	Mengukur tegangan AC dengan Osiloskop	8-25
8.41	Mengukur Arus AC dengan Osiloskop	8-26
8.42	Mengukur beda phasa dengan Osiloskop	8-26
8.43	Mengukur sudut penyalaan TRIAC dengan Osiloskop	8-27
8.44	Mengukur sudut penyalaan TRIAC dengan Osiloskop	8-28
8.45	Sinyal input berbeda fasa 900 dg output	8-28
8.46	Lissajous untuk menentukan frekuensi	8-29

Bab 9 Elektronika Dasar

9.1	Transistor	9-2
9.2	Thyristor	9-2
9.3	Orbit atom	9-3
9.4	Semikonduktor Tipe N	9-3
9.5	Semikonduktor Tipe P	9-4
9.6	Sambungan PN	9-4
9.7	Simbol dan fisik Diode	9-5
9.8	Diode Panjar Maju	9-5
9.9	Diode Panjar Mundur	9-6
9.10	Karakteristik Diode	9-6
9.11	Aplikasi Diode Zener sebagai penstabil tegangan	9-7
9.12	Karakteristik Diode Zener	9-7

9.13	Transistor Bipolar	9-8
9.14	Rangkaian Dasar Transistor	9-8
9.15	Tegangan Bias Transistor NPN	9-8
9.16	Karakteristik Transistor	9-9
9.17	Fisik Transistor	9-9
9.18	Transistor dengan Tahanan Bias	9-10
9.19	Karakteristik Output Transistor	9-11
9.20	Tegangan bias Transistor	9-11
9.21	Karakteristik Input Transistor	9-12
9.22	Rangkaian Bias Pembagi Tegangan Tanpa RC	9-13
9.23	Rangkaian Bias Pembagi Tegangan Dengan RC	9-13
9.24	Rangkaian Bistable Multivibrator	9-14
9.25	Diagram Waktu Bistable Multivibrator	9-15
9.26	Rangkaian dan Diagram Waktu Schmitt Trigger	9-15
9.27	Prinsip Kerja Penguat	9-16
9.28	Karakteristik Transistor Empat Kuadran	9-16
9.29	Sinyal Pada Titik-titik Pengukuran	9-17
9.30	Penguatan Sinyal	9-17
9.31	Titik Kerja Penguat Klas AB	9-18
9.32	Rangkaian Push-Pull	9-18
9.33	Casis Transistor Dengan Isolator	9-19
9.34	Bentuk Pendingin Transistor	9-19
9.35	Pemindahan Panas Pada Pendingin Transistor	9-19

Bab 10. Elektronika Daya

10.1	Pemanfaatan Energi Listrik	10-2
10.2	Diagram Blok Konverter Daya	10-3
10.2	Diagram Blok Konverter Daya	10-4
10.4	Thyristor	10-4
10.5	Simbol dan fisik Diode	10-5
10.6	a) Panjar maju (forward) dan b) panjar mundur (reverse)	10-5
10.7	Karakteristik Diode	10-6
10.8	Karakteristik Output Transistor	10-6
10.9	Transistor Sebagai Saklar	10-7
10.10	Tegangan Operasi Transistor sebagai saklar	10-7
10.11	Garis Beban Transistor	10-7
10.12	Transistor Sebagai Gerbang NAND	10-8
10.13	Transistor Sebagai Penggerak Relay	10-9
10.14	Bentuk Fisik & Simbol Thrystor	10-9
10.15	Karakteristik Thrystor	10-10
10.16	Nilai Batas Thrystor	10-10
10.17	Fuse Sebagai Pengaman Thrystor	10-11
10.18	Struktur Fisik dan Kemasan IGBT	10-11
10.19	Karakteristik Output IGBT	10-12
10.20	Diode Setengah Gelombang 1 Phasa	10-12
10.21	Rangkaian Penyearah Jembatan - Diode	10-13

DAFTAR GAMBAR

10.23	Penyearah Jembatan Dengan Filter RC	10-14
10.24	Penyearah Diode ½ Gelombang 3 Phasa	10-15
10.25	Penyearah ½ Gelombang 3 Phasa Diode Terbalik	10-15
10.26	Urutan Kerja Penyearah Diode 3 Phasa ½ Gelombang	10-16
10.27	Penyearah Jembatan Gelombang Penuh 3 Phasa	10-17
10.28	Bentuk Gelombang Penyearah Penuh 3 Phasa	10-17
10.29	Penyearah Terkendali ½ Gelombang	10-19
10.30	Sudut Penyalaan dan Output Tegangan DC ½ Gelombang	10-19
10.31	Tegangan dan Arus DC Beban Resistif	10-19
10.32	Tegangan dan Arus DC Beban Induktif	10-20
10.33	Modul Trigger Thrystor	10-20
10.34	Penyearah Thrystor dengan Diode	10-20
10.35	Grafik Fungsi Penyalaan Gate Thrystor	10-21
10.36	Penyearah Terkendali Jembatan 1 Phasa	10-21
10.37	Penyearah Thyristor ½ Gelombang 3 Phasa	10-22
10.38	Grafik Pengaturan Sudut Penyalaan	10-23
10.39	Penyearah Terkendali 3 Phasa	10-23
10.40	Bentuk Tegangan DC Penyearah 3 Phasa	10-24
10.41	Urutan Penyalaan Gate-Thyristor 3 Phasa	10-24
10.42	Rangkaian Pembangkit Pulsa Chip TCA785	10-25
10.43	Bentuk Gelombang Chip TCA785	10-25
10.44	Rangkaian Daya 1 Phasa Beban DC 15 Kw	10-26
10.45	Aplikasi Pengendalian putaran Motor DC	10-26
10.46	Bentuk Dasar Pengendali Tegangan AC	10-27
10.47	Rangkaian Dimmer dengan TRIAC	10-28
10.48	Aplikasi IGBT Untuk Kontrol Motor Induksi 3 Phasa	10-29
10.49	Blok Diagram Pengaturan Kecepatan Motor DC	10-29

Bab 11 Sistem Pengamanan Bahaya Listrik

11.1	Grafik bahaya arus listrik	11-2
11.2	Aliran listrik sentuhan langsung	11-2
11.3	Tahanan tubuh manusia	11-3
11.4a	Tegangan sentuh langsung	11-3
11.4b	Tegangan sentuh tidak langsung	11-3
11.5	Simbol pengamanan pada nameplate	11-4
11.6	Motor listrik tahan dari siraman air	11-4
11.7	Motor listrik tahan siraman air vertikal dan segala arah	11-4
11.8	Pelindung tangan dan mata	11-6
11.9a	Gangguan listrik dibeberapa titik	11-7
11.9b	Gangguan listrik dari beban lampu	11-7
11.10	Tegangan langkah akibat gangguan ke tanah	11-8
11.11	Peta Tindakan Pengamanan	11-8
11.12	Pengamanan dengan tegangan rendah	11-9
11.13	Stop kontak khusus untuk tegangan rendah	11-9
11.14	Pengaman dengan trafo pemisah	11-9

11.15	Pengamanan dengan selungkup isolasi	11-10
11.16	Kabel berisolasi thermoplastik	11-10
11.17	Perlindungan pengaman stop kontak	11-10
11.18	Pengamanan dengan rintangan	11-11
11.19	Jarak aman bentangan kabel udara	11-11
11.20	Pengamanan sentuhan tidak langsung	11-11
11.21a	Sistem Pembumian TN-S	11-13
11.21b	Sistem Pembumian TN-C-S	11-13
11.21c	Sistem pembumian TN-C	11-13
11.22	Sistem Pembumian TT	11-13
11.23	Sistem Pembumian IT	11-14
11.24	Sistem pembumian TN-C-S digabung kawat PE	11-14
11.25	Beda tegangan titik netral akibat gangguan ke tanah	11-14
11.26	Prinsip kerja ELCB	11-15
11.27	Fisik ELCB	11-16
11.28	Pemasangan ELCB untuk pengamanan kelompok beban	11-16
11.29	ELCB portabel	11-16
11.30	ELCB pada pembumian TN	11-17
11.31	Pengukuran tahanan pembumian sistem TT	11-17
11.32	ELCB pada sistem TT	11-17
11.33	Pengukuran tahanan pembumian sistem IT	11-18
11.34	Simbol pengamanan isolasi ganda	11-19
11.35	Isolasi ganda pada peralatan listrik	11-19
11.36	Mesin bor dengan isolasi ganda	11-20
11.37	Jarak aman pengamanan ruang kerja	11-20
11.38	Pengamanan dengan pemisahan sirkit listrik	11-21
11.39	Trafo pemisah melayani dua stop kontak	11-21
11.40	Pengamanan pada peralatan listrik	11-21
11.41	Pengukuran pembumian dengan megger	11-22
11.42	Pengukuran tahanan isolasi	11-22
11.43	Pengukuran tahanan isolasi lantai/dinding	11-23
11.44	Pengujian sistem pembumian TN	11-24
11.45	Pengukuran tahanan pembumian	11-24
11.46	Pengukuran tahanan bumi ELCB	11-25

Bab 12 Teknik Pengaturan Otomatis

12.1	Pengaturan manual tegangan pada Generator	12-2
12.2	Diagram blok sistem kontrol	12-3
12.3	Pengaturan tegangan secara otomatis	12-4
12.4	Diagram blok sistem kontrol open-loop	12-5
12.5	Diagram blok sistem kontrol closed-loop	12-6
12.6	Sistem Pemanasan Air	12-7
12.7	Diagram blok sistem pemanasan air	12-8
12.8	Diagram blok sistem pemanasan air secara otomatis	12-8
12.9	Pengaturan tinggi permukaan air	12-9

DAFTAR GAMBAR

12.10	Diagram blok pengaturan tinggi air	12-9
12.11	Prototipe mobile robot	12-9
12.12	Kontrol otomatis pada mobile robot	12-10
12.13	Perilaku statis Generator Arus Searah	12-11
12.14	Hubungan tegangan fungsi arus	12-11
12.15	Perubahan Tegangan fungsi Arus Eksitasi	12-12
12.16	Sistem PT0	12-12
12.17	Model fisik PT1	12-13
12.18	Respon Kontrol PT1	12-14
12.19	Model Sistem Kontrol PT2	12-14
12.20	Respon Sistem PT2	12-15
12.21	Respon kontrol PTn	12-15
12.22	Model Dead Time	12-16
12.23	Respon Kontrol Deadtime	12-16
12.24	Kontroler dua posisi (On-Off)	12-17
12.25	Simbol kontrol on-off	12-18
12.26	Kontroler suhu bimetal	12-18
12.27	Kontrol tiga posisi	12-19
12.28	Karakteristik dan simbol kontroler tiga posisi	12-19
12.29	Karakteristik kontroler tiga posisi dengan posisi tengah nol	12-19
12.30	Kontrol proporsional	12-20
12.31	Aplikasi kontroler proporsional	12-20
12.32	Respon kontrol proporsional	12-20
12.33	Kontroler Integral	12-21
12.34	Aplikasi kontroler integral	12-21
12.35	Kontroler Proporsional Integral	12-22
12.36	Aplikasi Kontroler PI	12-22
12.37	Respon kontroler derivatif untuk sinyal step	12-23
12.38	Respon kontroler derivatif untuk sinyal lereng	12-23
12.39	Aplikasi Kontroler Derivatif	12-23
12.40	Respon kontroler PD terhadap sinyal lereng	12-24
12.41	Aplikasi Kontroler PD	12-24
12.42	Respon kontroler PID terhadap sinyal step	12-25
12.43	Aplikasi kontroler PID	12-25
12.44	Karakteristik osilasi	12-26
12.45	Komponen elektropneumatik	12-28
12.46	Tombol NO,NC dan toggle	12-29
12.47	Limit switch	12-29
12.48	Limit switch tekanan	12-30
12.49	Proximity switch terpasang pada silinder	12-30
12.50	Konstruksi Relay dan kontaktor	12-31
12.51	Kontaktor dengan kontak utama dan kontak bantu	12-32
12.52	Katup Magnetik	12-32
12.53	Batang jangkar katup magnetik	12-33
12.54	Katup magnetik 3/2	12-33
12.55	Katup magnetik 5/2	12-34
12.56	Katup magnetik impulse 5/2	12-34
12.57	Katup magnetik 5/3	12-34

12.58 Silinder tunggal dengan dgn katup magnetik 3/2	12-35
12.59 Silinder operasi ganda katup 5/2	12-35
12.60 Silinder ganda dengan katup 5/3	12-36

Bab 13. Generator Sinkron

13.1 Generator Sinkron Tiga Fasa dengan Penguatan Generator DC "Pilot Exciter".	13-3
13.2 Generator Sinkron Tiga Fasa dengan Sistem Penguatan "Brushless Exciter System".	13-3
13.3 Bentuk Rotor	13-4
13.4 Inti Stator dan Alur pada Stator	13-4
13.5 Belitan Satu Lapis Generator Sinkron Tiga Fasa	13-5
13.6 Urutan Fasa ABC	13-6
13.7 Belitan Berlapis Ganda Generator Sinkron Tiga Fasa	13-6
13.8 Diagram Phasor dari Tegangan Induksi Lilitan	13-8
13.9 Total ggl Et dari Tiga ggl Sinusoidal	13-8
13.10 Kisar Kumparan	13-9
13.11 Vektor Tegangan Lilitan	13-9
13.12 Diagram Generator AC Satu Fasa Dua Kutub.	13-11
13.13 Diagram Generator AC Tiga Fasa Dua Kutub	13-12
13.14 Kurva dan Rangkaian Ekuivalen Generator Tanpa Beban	13-13
13.15 Kondisi Reaksi Jangkar	13-14
13.16 Vektor Diagram dari Beban Generator	13-15
13.17 Rangkaian Test Generator Tanpa Beban.	13-16
13.18 Rangkaian Test Generator di Hubung Singkat	13-17
13.19 Karakteristik Tanpa Beban dan Hubung Singkat sebuah Generator	13-17
13.20 Pengukuran Resistansi DC	13-18
13.21 Vektor Diagram Pf "Lagging"	13-19
13.22 Vektor Arus Medan	13-20
13.23 Karakteristik Beban Nol, Hubung Singkat, dan Vektor Arus Medan.	13-21
13.24 Diagram Potier	13-22
13.25 Vektor Diagram Potier	13-23
13.26 Rangkaian Paralel Generator	13-24
13.27 Rangkaian Lampu Berputar	13-25
13.28 Sychroscope	13-26

Bab 14. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

14.1 Generator	14-2
14.2 Penyaluran energi listrik dari sumber ke beban	14-3
14.3 Distribusi Tenaga Listrik ke Konsumen	14-4
14.4 Instalasi Penyediaan dan Pemanfaatan Tenaga Listrik	14-4
14.5 Saluran penghantar udara untuk rumah tinggal (mengganggu keindahan pandangan)	14-9

DAFTAR GAMBAR

14.6	Saluran kabel bawah tanah pada suatu perumahan elit	14-10
14.7	Situasi	14-11
14.8	Denah rumah tipe T-125 lantai dasar	14-13
14.9	Instalasi rumah tipe T-125 lantai dasar	14-14
14.10	Diagram satu garis instalasi listrik pada bangunan Tegangan Rendah 380/220V.	14-15
14.11	Diagram satu garis instalasi listrik pada bangunan system tegangan Menengah 20KV dan Tegangan Rendah 380/220V.	14-16
14.12	APP Sistem satu fasa	14-17
14.13	APP Sistem tiga fasa	14-17
14.14	Contoh cubicle di ruang praktik POLBAN	14-20
14.15	MCB (Miniatur Circuit Breaker)	14-21
14.16	Molded Case Circuit Breaker	14-22
14.17	ACB (Air Circuit Breaker)	14-23
14.18	OCB (Oil Circuit Breaker)	14-24
14.19	VCB (Vakum Circuit Breaker)	14-24
14.20	SF ₆ CB (Sulfur Hexafluoride Circuit Breaker)	14-25
14.21	Diagram Transmisi dan Distribusi	14-26
14.22	Rangkaian macam-macam Beban Sistem 3 phasa, 4 kawat.....	14-27
14.23	Macam-macam Stop Kontak	14-28
14.24	Piranti-piranti menggunakan motor	14-30

Bab 15. Pembangkit Listrik Mikrohidro

15.1	Turbin dan Generator Mikrohidro	15-2
15.2	Sistem Pembangkit Listrik Mikrohidro	15-3
15.3	Mengukur ketinggian jatuh air	15-5
15.4	Mengukur debit air	15-6
15.5	Jalur pipa a) yang melingkar b) jalur memintas	15-7
15.6	Pipa melintas dan pembuangan air ke sungai	15-8
15.7	Tandon Air	15-9
15.8	Pemasangan Turbin dan Generator	15-11
15.9	Hubungan kontrol kelistrikan	15-12
15.10	Electronic Load Kontroller	15-13

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Kemampuan Hantar Arus	1-10
Tabel 1.2 Resistansi dan Konduktivitas.....	1-12
Tabel 1.3 Tegangan dan arus pada Resistor.....	1-12
Tabel 1.5 Tahanan jenis bahan	1-14
Tabel 1.6 Koefisien temperatur bahan pada 20 ⁰ C.....	1-15
Tabel 1.8 Pengukuran	1-16
Tabel 2.1 Permeabilitas	2-12
Tabel 2.2 Parameter dan rumus kemagnetan	2-15
Tabel 3.1 Harga Sesaat Tegangan Sinusoida.....	3-8
Tabel 3.2 Harga rata-rata gelombang sinusoida.....	3-9
Tabel 3.3 Harga efektif gelombang sinusoida	3-10
Tabel 3.4 Bentuk tegangan dan arus listrik AC.	3-12
Tabel 3.5 Tabel Nameplate Motor Induksi.....	3-53
Tabel 4.1 Grup rangkaian umum untuk arus putar-transformator daya....	4-25
Tabel 6.1 Notasi pengenal belitan Generator DC.....	6-11
Tabel 6.2 Rangkaian Motor-motor DC	6-19
Tabel 6.3 Hubungan Sisi Kumparan dengan Lamel Belitan Gelung.....	6-25
Tabel 6.4 Hubungan Sisi Kumparan dengan Lamel Belitan Gelombang...	6-27
Tabel 8.1. Besaran Sistem Internasional.....	8-3
Tabel 8.2. Besaran dan Simbol Kelistrikan.....	8-3
Tabel 9.1. Batasan Nilai Transistor.....	9-10
Tabel 9.2. Aplikasi Transistor	9-10
Tabel 10.1. Jenis Penyearah Diode.....	10-18
Tabel 11.1. Contoh Simbol Indek Proteksi Alat Listrik	11-5
Tabel 11.2. Kode IP XX	11-6
Tabel 11.3. Tegangan Sentuh yang aman	11-8
Tabel 11.4. Jenis Pembumian Sistem	11-12
Tabel 11.5. Waktu pemutusan maksimum sistem TN	11-15
Tabel 11.6. Penampang pengantar sistem TN	11-15
Tabel 11.7. Kemampuan ELCB pada tegangan 230V.....	11-16
Tabel 11.8. Tahanan Pembumian RA pada Sistem TT	11-16
Tabel 11.9. Waktu Pemutusan Maksimum Pada Sistem IT.....	11-19
Tabel 11.10. Nilai resistansi isolasi minimum	11-23
Tabel 11.11. Waktu pemutusan maksimum sistem TN	11-24
Tabel 12.1. Contoh komponen sistem kontrol	12-4
Tabel 12.2. Istilah penting dalam sistem kontrol.....	12-4
Tabel 12.3. Aplikasi Op-Amp Sebagai Kontroller.....	12-26
Tabel 12.4. Perbandingan jenis kontroller untuk masing-masing aplikasi .	12-27
Tabel 12.5. Parameter kontroller pendekatan Chien/Hornes/Reswick	12-28
Tabel 12.6. Parameter Ziegler-Nichols	12-28
Tabel 14.1. Daya tersambung pada tegangan menengah	14-5
Tabel 14.2. Daya tersambung fungsi arus primer	14-6

DAFTAR TABEL

Tabel 14.3. Daya tersambung fungsi Pelabur	14-7
Tabel 14.4. Daya Tersambung Tiga Phasa	14-7
Tabel 14.5. Golongan Pelanggan PLN	14-8
Tabel 14.6. Standar Daya PLN	14-18

ISBN 978-979-060-081-2
ISBN 978-979-060-082-9

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 45 Tahun 2008 tanggal 15 Agustus 2008 tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran yang Memenuhi Syarat Kelayakan untuk digunakan dalam Proses Pembelajaran.

HET (Harga Eceran Tertinggi) Rp. 13.794,00