



Siswoyo

# Teknik Listrik INDUSTRI

untuk  
Sekolah Menengah Kejuruan

JILID 3

TEKNIK LISTRIK INDUSTRI JILID 3

untuk SMK

Siswoyo



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

Siswoyo

# TEKNIK LISTRIK INDUSTRI

JILID 3

**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 3

**Untuk SMK**

Penulis : Siswoyo

Perancang Kulit : TIM

Ukuran Buku : 17,6 x 25 cm

SIS SISWOYO

t

Teknik Listrik Industri Jilid 2 untuk SMK /oleh Siswoyo ----  
Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan,  
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah,  
Departemen Pendidikan Nasional, 2008.  
iii , 194 hlm

ISBN : 978-979-060-081-2

ISBN : 978-979-060-083-6

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 ucapkan 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 10**

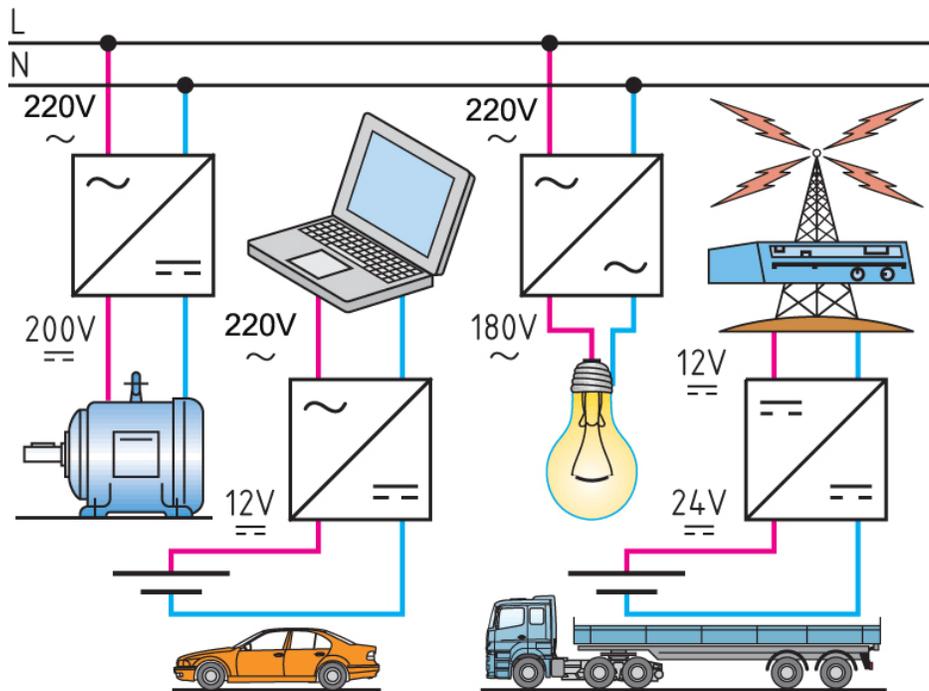
## **ELEKTRONIKA DAYA**

**Daftar Isi :**

10.1	Konversi Daya .....	10-1
10.2	Komponen Elektronika Daya .....	10-4
10.3	Diode .....	10-4
10.4	Transistor .....	10-6
10.5	Thyristor .....	10-9
10.6	IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) .....	10-11
10.7	Penyearah Diode .....	10-12
10.8	Penyearah Terkendali Thyristor .....	10-18
10.9	Modul Trigger TCA 785 .....	10-25
10.10	Aplikasi Elektronika Daya .....	10-26
10.11	Rangkuman .....	10-30
10.12	Soal-soal .....	10-31

## 10.1. Konversi Daya

Ada empat tipe konversi daya, ada empat jenis pemanfaatan energi yang berbeda-beda **gambar-10.1**. Pertama dari listrik PLN 220 V melalui penyearah yang mengubah listrik AC menjadi listrik DC yang dibebani motor DC. Kedua mobil dengan sumber akumulator 12 V dengan inverter yang mengubah listrik DC menjadi listrik AC dihasilkan tegangan AC 220 V dibebani PC. Ketiga dari sumber PLN 220 V dengan AC konverter diubah tegangannya menjadi 180 V untuk menyalakan lampu. Keempat dari sumber Akumulator truk 24 V dengan DC konverter diubah tegangan 12 V untuk pesawat CB Transmitter.



Gambar 10.1 : Pemanfaatan Energi Listrik

Pada **gambar-10.1** dijelaskan ada empat konverter daya yang terbagi dalam empat kuadran.

1. **Kuadran 1** disebut **penyearah** fungsinya menyearahkan listrik arus bolak-balik menjadi listrik arus searah. Energi mengalir dari sistem listrik AC satu arah ke sistem DC.

**Contoh:** Listrik AC 220 V/50 Hz diturunkan melewati trafo menjadi 12VAC dan kemudian disearahkan oleh Diode menjadi tegangan DC 12V

2. **Kuadran 2** disebut **DC chopper** atau dikenal juga dengan istilah DC-DCkonverter. Listrik arus searah diubah dalam menjadi arus searah dengan besaran yang berbeda.

**Contoh:** Listrik DC 15V dengan komponen elektronika diubah menjadi listrik DC 5V.

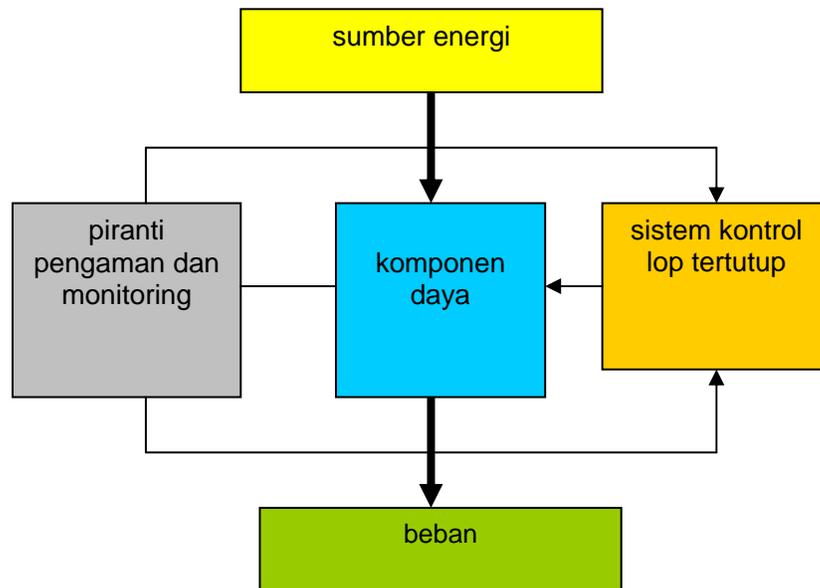
3. **Kuadran 3** disebut **inverter** yaitu mengubah listrik arus searah menjadi listrik arus bolak-balik pada tegangan dan frekuensi yang dapat diatur.

**Contoh:** Listrik DC 12 V dari akumulator dengan perangkat inverter diubah menjadi listrik tegangan AC 220V, frekuensi 50 Hz.

4. **Kuadran 4** disebut **AC-AC konverter** yaitu mengubah energi listrik arus bolak balik dengan tegangan dan frekuensi tertentu menjadi arus bolak balik dengan tegangan dan frekuensi yang lain. Ada dua jenis konverter AC, yaitu *pengatur tegangan AC* (tegangan berubah, frekuensi konstan) dan *cycloconverter* (tegangan dan frekuensi dapat diatur).

**Contoh:** tegangan AC 220 V dan frekuensi 50 Hz menjadi tegangan AC 110 V dan frekuensi yang baru 100 Hz.

Rancangan konverter daya paling sedikit mengandung lima elemen **gambar-10.2**, yaitu (1) sumber energi, (2) komponen daya, (3) piranti pengaman dan monitoring, (4) sistem kontrol lop tertutup dan (5) beban.

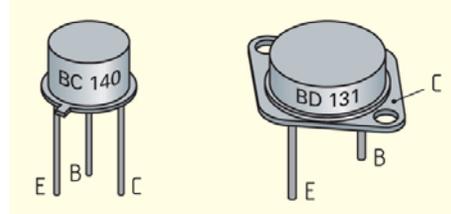


Gambar 10.2 : Diagram Blok Konverter Daya

## 10.2. Komponen Elektronika Daya

Bahan konduktor memiliki sifat menghantar listrik yang tinggi, bahan konduktor dipakai sebagai konduktor listrik, seperti kawat tembaga, aluminium, besi, baja, dsb. Bahan semikonduktor memiliki sifat bisa menjadi penghantar atau bisa juga memiliki sifat menghambat arus listrik tergantung kondisi tegangan eksternal yang diberikan. Ketika diberikan tegangan bias maju, maka semikonduktor akan berfungsi sebagai konduktor. Tetapi ketika diberikan bias mundur, bahan semikonduktor memiliki sifat sebagai isolator. Beberapa komponen elektronika daya meliputi: *Diode, Transistor, Thyristor, Triac, IGBT* dsb.

Diode yang dipakai elektronika daya memiliki syarat menahan tegangan anoda-katode ( $V_{AK}$ ) besar, dapat melewatkan arus anoda ( $I_A$ ) yang besar, kemampuan menahan perubahan arus sesaat  $di/dt$  serta kemampuan menahan perubahan tegangan sesaat  $dv/dt$ . Komponen Transistor daya harus memenuhi persyaratan memiliki tegangan kolektor-emiter ( $V_{CEO}$ ) yang besar, arus kolektor ( $I_C$ ) terpenuhi, penguatan DC ( $\beta$ ) yang besar, mampu menahan perubahan tegangan sesaat  $dv/dt$ . Demikian juga dengan komponen Thyristor mampu menahan tegangan anoda-katoda ( $V_{AK}$ ), mengalirkan arus anoda yang besar ( $I_A$ ), menahan perubahan arus sesaat  $di/dt$ , dan mampu menahan perubahan tegangan sesaat  $dv/dt$  **gambar 10.3** dan **gambar 10.4**.



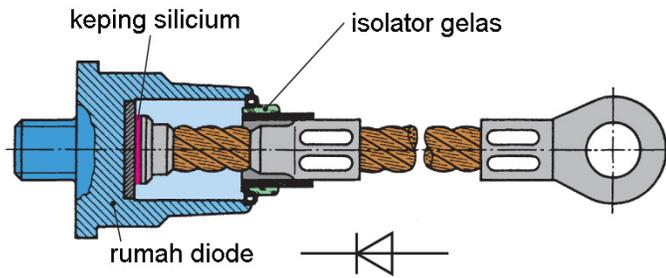
Gambar 10.3: Transistor daya



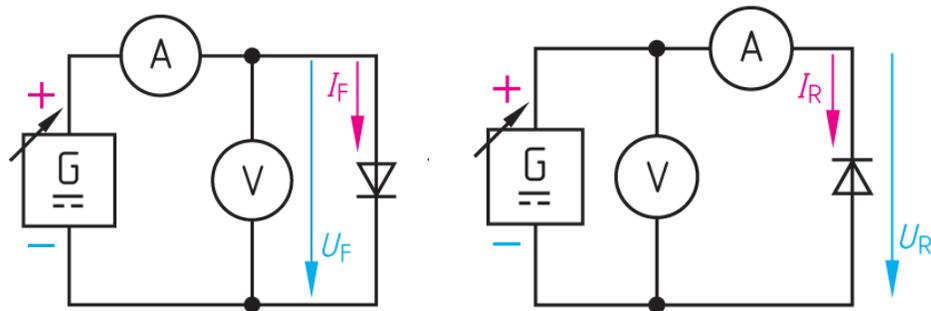
Gambar 10.4: Thyristor

## 10.3. Diode

Diode memiliki dua kaki, yaitu Anoda dan Katoda **gambar 10.5**. Diode hanya dapat melewatkan arus listrik dari satu arah saja, yaitu dari anode ke katoda yang disebut posisi panjar maju (*forward*). Sebaliknya Diode akan menahan aliran arus atau memblok arus yang berasal dari katode ke anoda, yang disebut panjar mundur (*reverse*) **gambar 10.6**. Namun Diode memiliki keterbatasan menahan tegangan panjar mundur yang disebut tegangan break down. Jika tegangan ini dilewati maka Diode dikatakan rusak dan harus diganti yang baru.



Gambar 10.5. Simbol dan fisik Diode

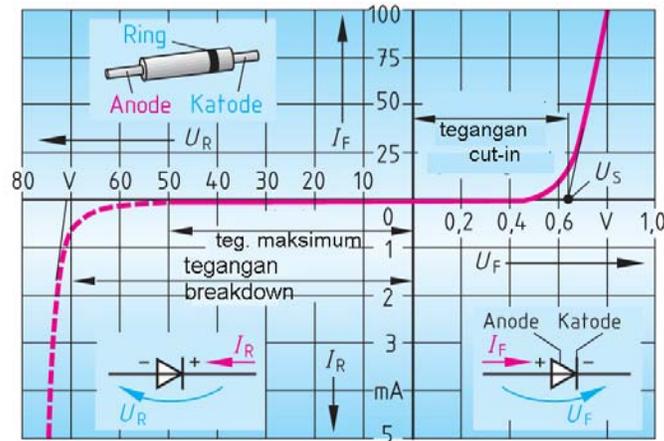


Gambar 10.6. a) Panjar maju (forward) dan b) panjar mundur (reverse)

Pada kondisi panjar maju (*forward*) Diode mengalirkan arus DC dapat diamati dari penunjukan ampermeter dengan arus  $I_f$ , untuk tegangan disebut tegangan maju  $U_f$  (*forward*). Diode silikon akan mulai *forward* ketika telah dicapai tegangan *cut-in* sebesar 0,7 Volt, untuk Diode germanium tegangan *cut-in* 0,3 Volt.

Pada kondisi panjar mundur (*reverse*) Diode dalam posisi memblokir arus, kondisi ini disebut posisi mundur (*reverse*). Karakteristik sebuah Diode digambarkan oleh sumbu horizontal untuk tegangan (Volt). Sumbu vertikal untuk menunjukkan arus (*mA* sampai *Amper*). Tegangan positif (*forward*) dihitung dari sumbu nol ke arah kanan. Tegangan negatif (*reverse*) dimulai sumbu negatif ke arah kiri.

Karakteristik Diode menggambarkan arus fungsi dari tegangan. Garis arus maju (*forward*) dimulai dari sumbu nol keatas dengan satuan Amper. Garis arus mundur (*reverse*) dimulai sumbu nol ke arah bawah dengan orde *mA*. Diode memiliki batas menahan tegangan *reverse* pada nilai tertentu. Jika tegangan *reverse* terlampaui maka Diode akan rusak secara permanen **gambar 10.7**.



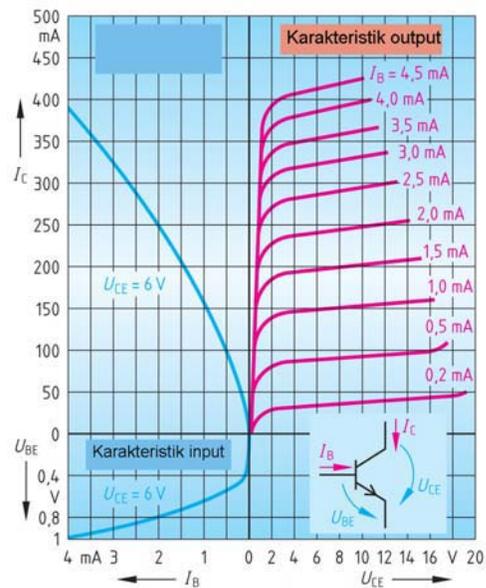
Gambar 10.7: Karakteristik Diode

Dari pengamatan visual karakteristik diode diatas dapat dilihat beberapa parameter penting, yaitu : Tegangan cut-in besarnya 0,6V tegangan reverse maksimum yang diijinkan sebesar 50V, tegangan breakdown terjadi pada tegangan mendekati 75V. Jika tegangan breakdown ini terlewati dipastikan diode akan terbakar dan rusak permanen.

### 10.4. Transistor Daya

Pembahasan tentang Transistor sudah dibahas pada Bab 9 Elektronika Dasar, bahwa Transistor memiliki dua kemampuan, pertama sebagai penguatan dan kedua sebagai saklar elektronik. Dalam aplikasi elektronika daya, Transistor banyak digunakan sebagai saklar elektronika. Misalnya dalam teknik Switching Power Supply, Transistor berfungsi bekerja sebagai saklar yang bekerja ON/OFF pada kecepatan yang sangat tinggi dalam orde mikro detik.

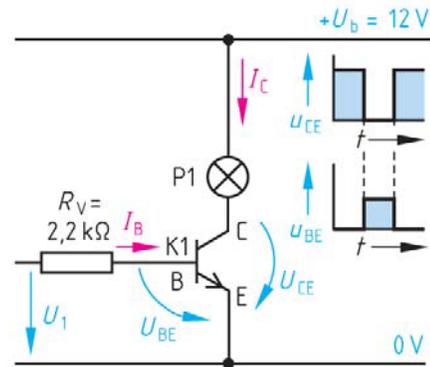
Karakteristik output Transistor BD 135 yang diperlihatkan pada **gambar-10.8**. Ada sepuluh perubahan arus basis  $I_B$ , yaitu dimulai dari terkecil  $I_B = 0,2$  mA, 0,5 mA, 1,0 mA, 1,5 mA sampai 4,0 mA dan terbesar 4,5 mA. Tampak perubahan arus kolektor  $I_C$  terkecil 50 mA, 100 mA, 150 mA sampai 370 mA dan arus kolektor  $I_C$  terbesar 400 mA.



Gambar 10.8: Karakteristik Output Transistor

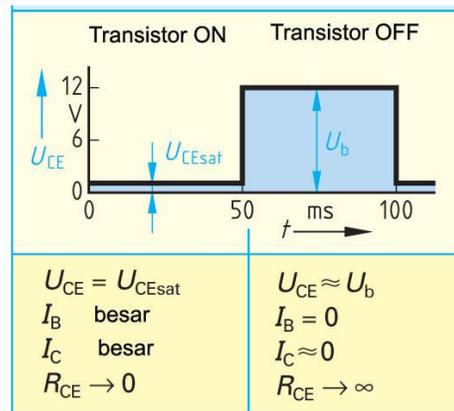
**10.4.1. Transistor sebagai Saklar**

Transistor dapat difungsikan sebagai saklar elektronik, yaitu dengan mengatur arus basis  $I_B$  dapat menghasilkan arus kolektor  $I_C$  yang dapat menghidupkan lampu P1 dan mematikan lampu. Dengan tegangan supply  $U_B = 12V$  dan pada tegangan basis  $U_1$ , akan mengalir arus basis  $I_B$  yang membuat Transistor *cut-in* dan menghantarkan arus kolektor  $I_C$ , sehingga lampu P1 menyala. Jika tegangan basis  $U_1$  dimatikan dan arus basis  $I_B=0$ , dengan sendirinya Transistor kembali mati dan lampu P1 akan mati. Dengan pengaturan arus basis  $I_B$  Transistor dapat difungsikan sebagai saklar elektronik dalam posisi ON atau OFF.

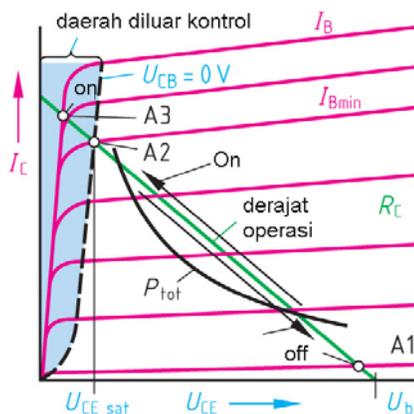


Gambar 10.9 : Transistor Sebagai Saklar

Ketika Transistor sebagai saklar kita akan lihat tegangan kolektor terhadap emitor  $U_{CE}$ . Ada dua kondisi, yaitu ketika Transistor kondisi ON, dan Transistor kondisi OFF. Saat Transistor kondisi ON tegangan  $U_{CE}$  saturasi. Arus basis  $I_B$  dan arus kolektor maksimum dan tahanan kolektor emitor  $R_{CE}$  mendekati nol, terjadi antara 0 sampai 50 mdetik. Ketika Transistor kondisi OFF, tegangan  $U_{CE}$  mendekati tegangan  $U_B$  dan arus basis  $I_B$  dan arus kolektor  $I_C$  mendekati nol, pada saat tersebut tahanan  $R_{CE}$  tak terhingga **gambar-10.10**.



Gambar 10.10 : Tegangan Operasi Transistor sebagai saklar



Gambar 10.11 : Garis Beban Transistor

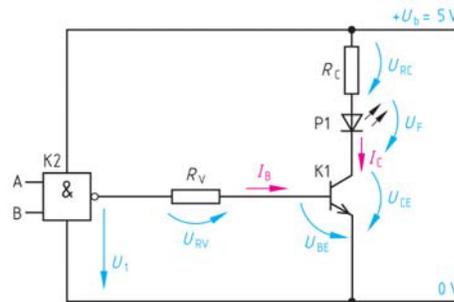
Karakteristik output Transistor memperlihatkan garis kerja Transistor dalam tiga kondisi. *Pertama* Transistor kondisi sebagai saklar ON terjadi ketika tegangan  $U_{CE}$  saturasi, terjadi saat arus basis  $I_B$  maksimum pada titik A3. *Kedua* Transistor berfungsi sebagai penguat sinyal input ketika arus basis  $I_B$  berada diantara arus kerjanya A2 sampai A1. *Ketiga* ketika arus basis  $I_B$  mendekati nol, Transistor kondisi OFF ketika tegangan  $U_{CE}$  sama dengan tegangan suply  $U_B$  titik A1 **gambar-10.11**.

$$I_B = \frac{U \cdot I_C}{B_{min}} \quad I_B = U \cdot I_{Bmin}$$

$$R_V = \frac{(U_1 - U_{BE}) \cdot B_{min}}{U \cdot I_C}$$

$U$	Faktor penguatan tegangan
$I_B$	Arus basis
$I_{Bmin}$	Arus basis minimum
$B_{min}$	Faktor penguatan Transistor ( $\beta$ )
$I_C$	Arus kolektor
$R_V$	Tahanan depan basis
$U_1$	Tegangan input
$U_{BE}$	Tegangan basis emitor

**Contoh :** Transistor BC 107 difungsikan gerbang NAND = Not And, tegangan sinyal 1  $U_1 = 3,4$  V, tegangan LED  $U_F = 1,65$  V, arus mengalir pada LED  $I_F = 20$  mA, tegangan  $U_{BE} = 0,65$  V, dan  $B_{min} = 120$ , tegangan saturasi  $U_{CEsat} = 0,2$  V dan faktor penguatan tegangan  $U = 3$ . **gambar-10.12** Tentukan besarnya tahanan RC dan RV ?



Gambar 10.12 : Transistor Sebagai Gerbang NAND

**Jawaban :**

$$a) R_C = \frac{U_b - U_F - U_{CEsat}}{I_f} = \frac{5V - 1,65V - 0,2V}{20mA}$$

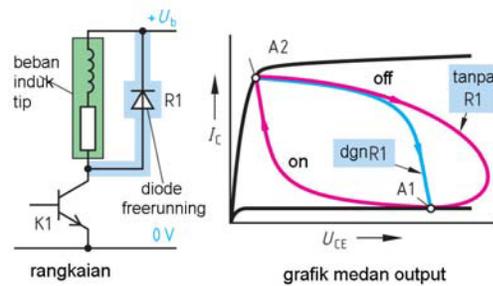
$$R_C = 158 \Omega ; R_C = 150 \Omega$$

$$b) R_V = \frac{(U_1 - U_{BE}) \cdot B_{min}}{U \cdot I_C} = \frac{(3,4V - 0,65V) \cdot 120}{3 \cdot 20mA}$$

$$R_V = 5,5 \text{ k}\Omega ; R_V = 5,6 \text{ k}\Omega$$

### 10.4.2. Transistor Penggerak Relay

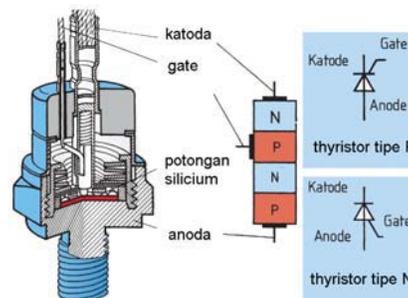
Kolektor Transistor yang dipasang kan relay mengandung induktor. Ketika Transistor dari kondisi ON dititik A2 dan menuju OFF di titik A1 timbul tegangan induksi pada relay. Dengan diode  $R1$  yang berfungsi sebagai *running diode* **gambar-10.13** maka arus induksi pada relay dialirkan lewat diode bukan melewati kolektor Transistor.



Gambar 10.13 : Transistor Sebagai Penggerak Relay

### 10.5. Thyristor

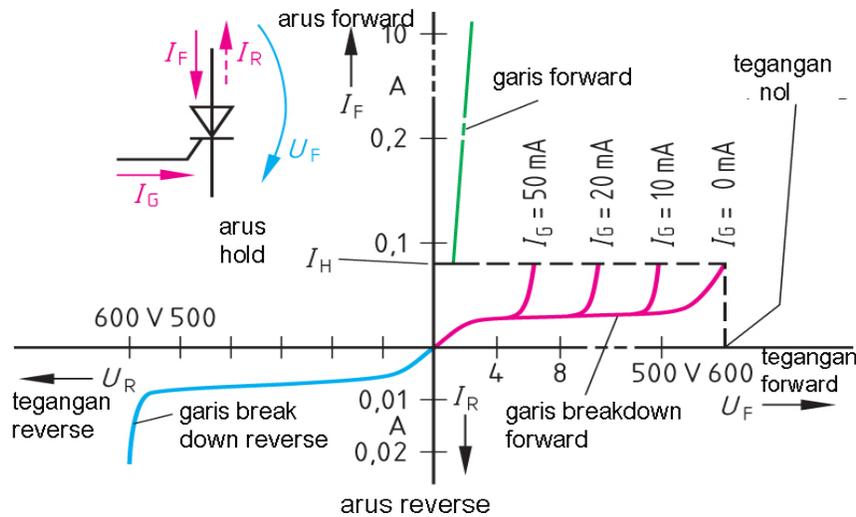
*Thyristor* dikembangkan oleh *Bell Laboratories* tahun 1950-an dan mulai digunakan secara komersial oleh General Electric tahun 1960an. *Thyristor* atau SCR (*Silicon Controlled Rectifier*) termasuk dalam komponen elektronik yang banyak dipakai dalam aplikasi listrik industri, salah satu alasannya adalah memiliki kemampuan untuk bekerja dalam tegangan dan arus yang besar. *Thyristor* memiliki tiga kaki, yaitu Anoda, Katoda dan Gate. Juga dikenal ada dua jenis *Thyristor* dengan P-gate dan N-gate **gambar-10.14**



Gambar 10.14 : Bentuk Fisik & Simbol Thyristor

*Fungsi Gate* pada *Thyristor* menyerupai basis pada Transistor, dengan mengatur arus gate  $I_G$  yang besarnya antara 1 mA sampai terbesar 100 mA, maka tegangan keluaran dari Anoda bisa diatur. Tegangan yang mampu diatur mulai dari 50 Volt sampai 5.000 Volt dan mampu mengatur arus 0,4 A sampai dengan 1500 A.

Karakteristik *Thyristor* memperlihatkan dua variabel, yaitu tegangan *forward*  $U_F$  dan tegangan *reverse*  $U_R$ , dan variabel arus *forward*  $I_F$  dan arus *reverse*  $I_R$  **gambar-10.15**. Pada tegangan *forward*  $U_F$ , jika arus gate diatur dari 0 mA sampai diatas 50 mA, maka *Thyristor* akan *cut-in* dan mengalirkan arus *forward*  $I_F$ . Tegangan *reverse* untuk *Thyristor*  $U_R$  sekitar 600 Volt. Agar *Thyristor* tetap ON, maka ada arus yang tetap dipertahankan disebut arus holding  $I_H$  sebesar 5 mA.



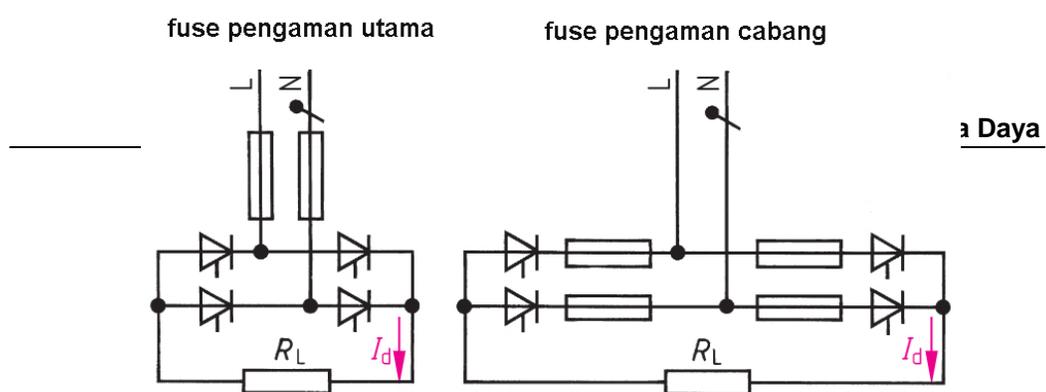
Gambar 10.15: Karakteristik Thyristor

Thyristor TIC 106 D sesuai dengan data sheet memiliki beberapa parameter penting, yaitu : tegangan gate-katode = 0,8 V, arus gate minimal 0,2 mA, agar Thyristor tetap posisi ON diperlukan arus holding = 5 mA. Tegangan kerja yang diijinkan pada Anoda = 400 V dan dapat mengalirkan arus nominal = 5 A.

TIC 106 D	
	<p><b>nilai variable</b></p> <p>tegangan pengapian <math>U_{gk}</math>      0,8 V                      arus pengapian <math>I_g</math>            0,2 mA                      arus hold <math>I_h</math>                    5 mA</p>
	<p><b>nilai batas</b></p> <p>tegangan reverse <math>U_R</math>            400 V                      arus forward <math>I_f</math>                5 A</p>

Gambar 10.16: Nilai Batas Thyristor

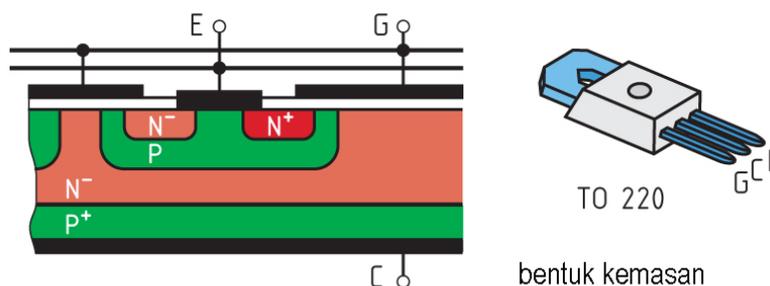
Aplikasi Thyristor yang paling banyak adalah sebagai penyearah tegangan AC ke DC yang dapat diatur. **Gambar-10.17** tampak empat Thyristor dalam hubungan jembatan yang dihubungkan dengan beban luar  $R_L$ .



Gambar 10.17: Fuse Sebagai Pengaman Thyristor

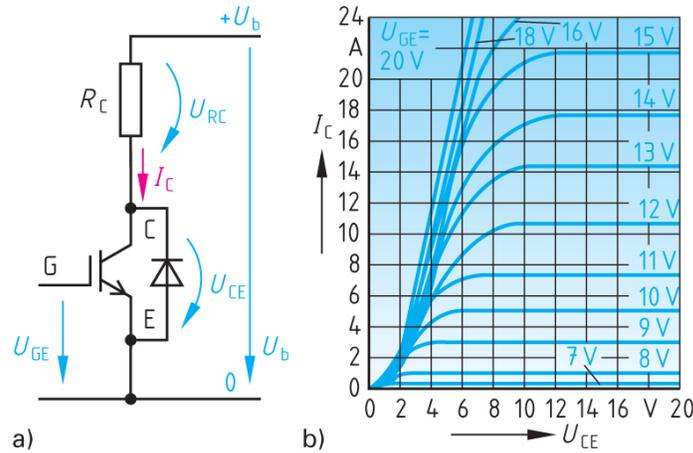
### 10.6. IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

IGBT komponen elektronika yang banyak dipakai dalam elektronika daya, aplikasinya sangat luas dipakai untuk mengatur putaran motor DC atau motor AC daya besar, dipakai sebagai inverter yang mengubah tegangan DC menjadi AC, dipakai komponen utama *Variable Voltage Variable Frequency* (VVVF) pada KRL *modern*, dipakai dalam kontrol pembangkit tenaga angin dan tenaga panas matahari. Dimasa depan IGBT akan menjadi andalan dalam industri elektronika maupun dalam listrik industri.



Gambar 10.18 : Struktur Fisik dan Kemasan IGBT

IGBT memiliki kesamaan dengan Transistor bipolar, perbedaannya pada Transistor bipolar arus basis  $I_B$  yang diatur. Sedangkan pada IGBT yang diatur adalah tegangan gate ke emitor  $U_{GE}$ . Dari **gambar-10.19** karakteristik IGBT, pada tegangan  $U_{CE} = 20$  V dan tegangan gate diatur dari minimum 8 V, 9 V dan maksimal 16 V, arus *Collector*  $I_C$  dari 2 A sampai 24 A.



Gambar 10.19 : Karakteristik Output IGBT

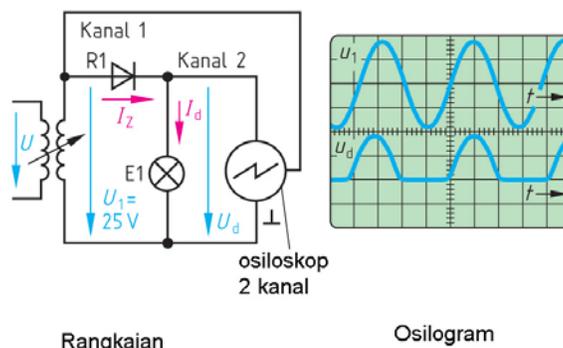
### 10.7. Penyearah Diode

Penyearah digunakan untuk mengubah listrik AC menjadi listrik DC, listrik DC dipakai untuk berbagai kebutuhan misalnya Power Supply, Pengisi Akumulator, Alat penyepuhan logam. Komponen elektronika yang dipakai Diode, atau *Thyristor*. Penyearah dengan Diode sering disebut *penyearah tanpa kendali*, artinya tegangan output yang dihasilkan tetap tidak bisa dikendalikan. Penyearah dengan *Thyristor* termasuk penyearah terkendali, artinya tegangan output yang dihasilkan bisa diatur dengan pengaturan penyalan sudut  $\alpha$  sesuai dengan kebutuhan.

Ada empat tipe penyearah dengan Diode, terdiri penyearah setengah gelombang dan gelombang penuh satu fasa dan setengah gelombang dan gelombang penuh tiga fasa.

#### 10.7.1. Penyearah Diode Setengah Gelombang Satu Fasa

Rangkaian transformator penurun tegangan dengan sebuah Diode  $R1$  setengah gelombang dan sebuah lampu  $E1$  sebagai beban. Sekunder trafo sebagai tegangan input  $U_1 = 25\text{ V}$  dan bentuk tegangan output DC dapat dilihat dari osiloskop. Tegangan input  $U_1$  merupakan gelombang sinusoida, dan tegangan output setelah Diode  $U_d$  bentuknya setengah gelombang bagian yang positifnya saja **gambar 10.20**.



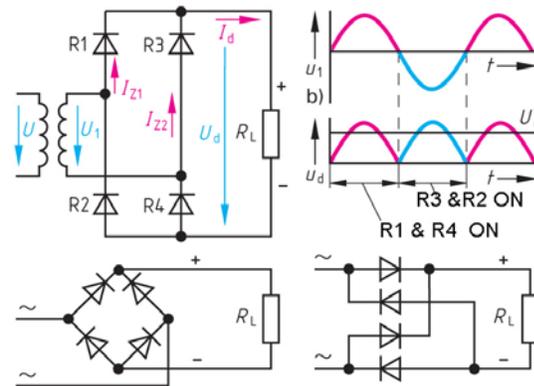
Gambar 10.20: Diode Setengah Gelombang 1 Fasa

Persamaan tegangan dan arus DC :

$U_{di}=0,45 \cdot U_1$	$U_{di}$	Tegangan searah ideal
	$U_d$	Tegangan searah
	$U_1$	Tegangan efektif
$I_z = I_d$	$I_z$	Arus melewati Diode
	$I_d$	Arus searah
$P_T = 3,1 \cdot P_d$	$P_T$	Daya transformator
	$P_d$	Daya arus searah

### 10.7.2. Penyearah Diode Gelombang Penuh Satu Fasa

Sekunder transformator penurun tegangan dipasang empat Diode  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$  dan  $R4$  yang dihubungkan dengan sistem jembatan **gambar 10.21**. Output dihubungkan dengan beban  $R_L$ . Tegangan DC pulsa pertama melalui Diode  $R1$  dan  $R4$ , sedangkan pulsa kedua melalui Diode  $R3$  dan  $R2$ . Tegangan DC yang dihasilkan mengandung riak gelombang dan bukan DC murni yang rata.



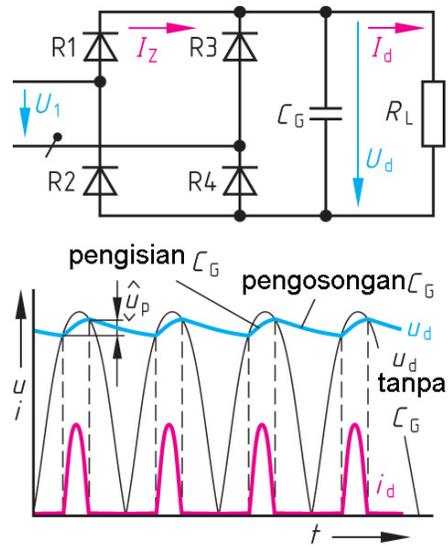
Gambar 10.21 : Rangkaian Penyearah Jembatan - Diode

Persamaan tegangan DC :

$U_{di}=0,9 \cdot U_1$	$U_{di}$	Tegangan searah ideal
	$U_d$	Tegangan searah
	$U_1$	Tegangan efektif
$I_z = \frac{I_d}{2}$	$I_z$	Arus melewati Diode
	$I_d$	Arus searah
$P_T = 1,23 \cdot P_d$	$P_T$	Daya transformator
	$P_d$	Daya arus searah

Penyearah gelombang penuh satu fasa bisa juga dihasilkan dari trafo yang menggunakan centre-tap (Ct), disini cukup dipakai dua buah diode, dan titik Ct difungsikan sebagai terminal negatifnya.

Untuk meratakan tegangan DC dipasang kapasitor elektrolit  $C_G$  berfungsi sebagai filter dengan beban  $R_L$  **gambar 10.22**. Ketika Diode  $R1$  dan Diode  $R4$  melakukan tegangan positif, kapasitor  $C_G$  mengisi muatan sampai penuh. Saat tegangan dari puncak menuju lembah, terjadi pengosongan muatan kapasitor. Berikutnya Diode  $R2$  dan Diode  $R3$  melewati tegangan negatif menjadi tegangan DC positif. Kapasitor  $C_G$  mengisi muatan dan mengosongkan muatan. Rangkaian filter dengan kapasitor menjadikan tegangan DC menjadi lebih rata **gambar 10.23**.



Gambar 10.22 : Penyearah Jembatan Dengan Filter Capacitor

$$C_G = \frac{0,75 \cdot I_d}{f_p \cdot U_p}$$

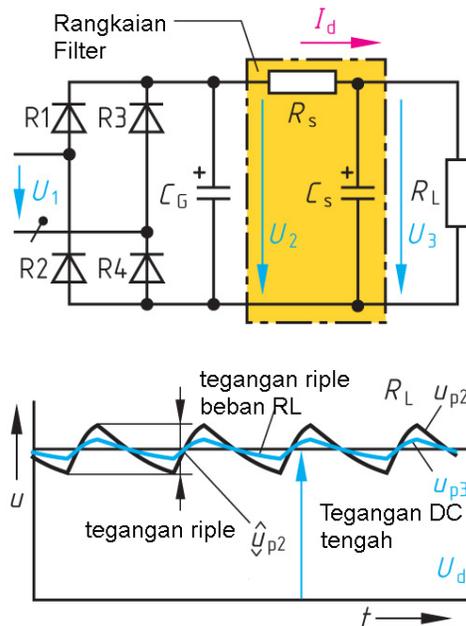
- $C_G$  Kondensator
- $I_d$  Arus searah
- $f_p$  Frekuensi ripple
- $U_p$  Tegangan ripple

**Contoh :** Penyearah gelombang penuh diberikan tegangan 12VAC, dan arus 1A, tegangan ripple  $u_p = 3,4V$ , frekuensi ripple  $f_p = 100Hz$ , tegangan cut-in Diode  $U_f = 0,7 V$ . Hitunglah:

- a) Faktor daya transformator
- b) Berapa besarnya tegangan AC
- c) Tentukan besarnya kapasitas kapasitor

**Jawaban :**

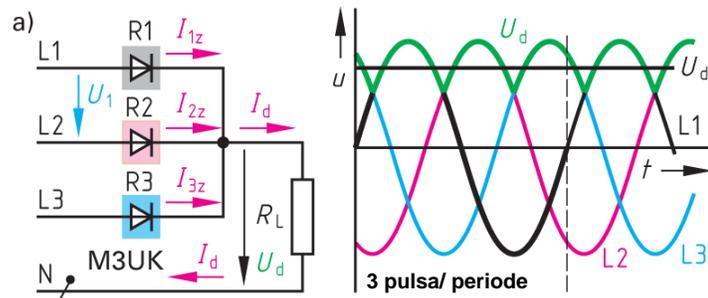
- a)  $P_T = 1,23 \cdot P_d = 1,23 \cdot 12V \cdot 1A = 14,8 W$
- b)  $U_1 = \frac{U_d}{\sqrt{2}} + 2 \cdot U_f = \frac{12V}{\sqrt{2}} + 2 \cdot 0,7 V = 9,88 V$
- c)  $C_G = \frac{0,75 \cdot I_d}{f_p \cdot U_p} = \frac{0,75 \cdot 1 A}{100 Hz \cdot 3,4 V} \approx 2200 \mu F$



Gambar 10.23 : Penyearah Jembatan Dengan Filter RC

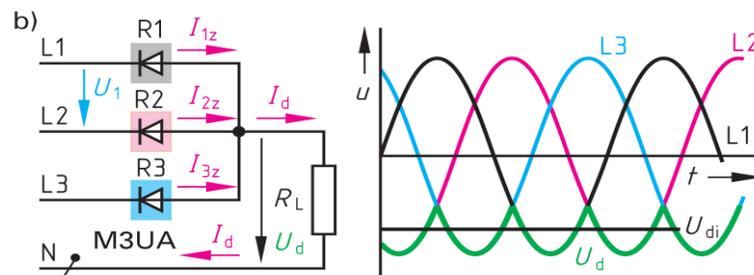
### 10.7.3. Penyearah Diode Setengah Gelombang Tiga Fasa

Rangkaian penyearah Diode tiga fasa menggunakan tiga Diode penyearah  $R_1$ ,  $R_2$  dan  $R_3$  ketika katodenya disatukan menjadi terminal positif **gambar-10.24**. Tegangan DC yang dihasilkan melalui beban resistif  $R_L$ . Masing-masing Diode akan konduksi ketika ada tegangan positif, sedangkan tegangan yang negatif akan diblok. Diode  $R_1$ ,  $R_2$  dan  $R_3$  akan konduksi secara bergantian sesuai dengan siklus gelombang saat nilainya lebih positif. Arus searah negatif kembali ke sekunder trafo melalui kawat N. Tegangan DC yang dihasilkan tidak benar-benar rata, masih mengandung riak (*ripple*).



Gambar 10.24 : Penyearah Diode  $\frac{1}{2}$  Gelombang 3 Fasa

Rangkaian penyearah Diode setengah gelombang dengan ketiga Diode  $R_1$ ,  $R_2$  dan  $R_3$  dipasang terbalik, ketiga anodenya disatukan sebagai terminal positif. Diode hanya konduksi ketika tegangan anode lebih positif dibandingkan tegangan katode. Tegangan DC yang dihasilkan negatif **gambar-10.25**.

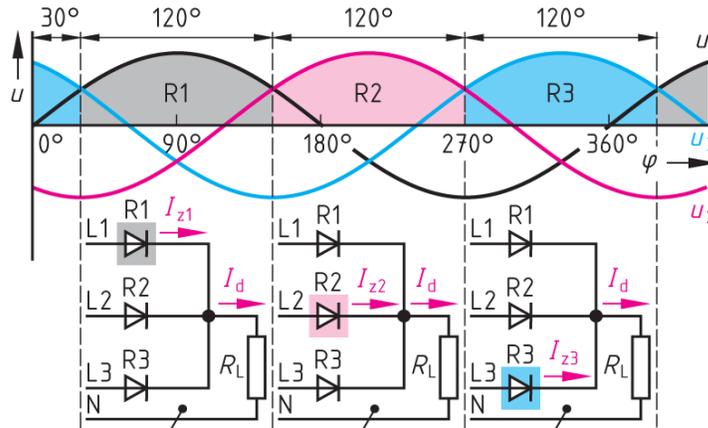


Gambar 10.25: Penyearah  $\frac{1}{2}$  Gelombang 3 Fasa Diode Terbalik

Urutan konduksi masing-masing Diode  $R_1$ ,  $R_2$  dan  $R_3$  pada penyearah setengah gelombang dapat diperiksa pada **gambar-10.56**.

- Diode  $R_1$  mulai konduksi setelah melewati  $30^\circ$ , sampai sudut  $150^\circ$ , atau sepanjang  $120^\circ$ .
- Diode  $R_2$  mulai konduksi pada sudut  $150^\circ$ , sampai  $270^\circ$ ,  $R_2$  juga konduksi sepanjang  $120^\circ$ .
- Diode  $R_3$  mulai konduksi pada sudut  $270^\circ$ , sampai  $390^\circ$  juga sepanjang  $120^\circ$ .

Dapat disimpulkan ketiga Diode memiliki sudut konduksi  $120^\circ$ .



Gambar 10.26 : Urutan Kerja Penyearah Diode 3 Fasa  $\frac{1}{2}$  Gelombang

Persamaan tegangan dan arus penyearah setengah gelombang:

$$U_{di} = 0,68 \cdot U_1$$

$U_{di}$  Tegangan searah ideal  
 $U_d$  Tegangan searah  
 $U_1$  Tegangan efektif

$$I_z = \frac{I_d}{3}$$

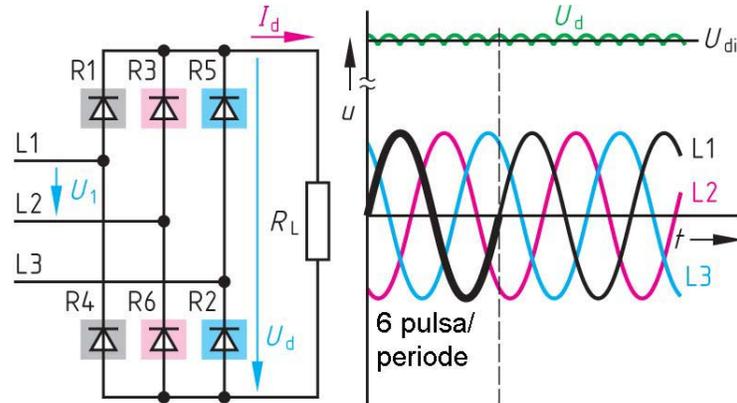
$I_z$  Arus melewati Diode  
 $I_d$  Arus searah

$$P_T = 1,5 \cdot P_d$$

$P_T$  Daya transformator  
 $P_d$  Daya arus searah

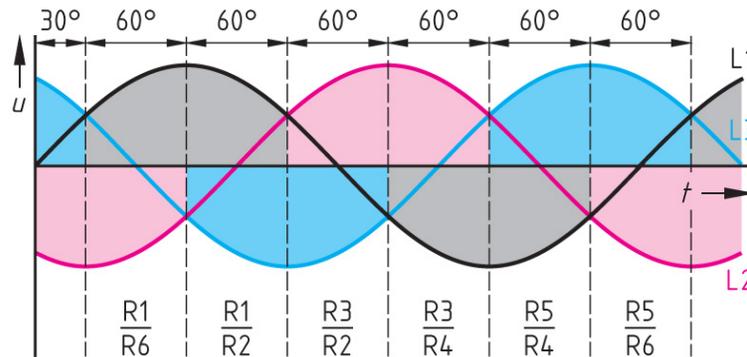
#### 10.7.4. Penyearah Diode Gelombang Penuh Tiga Fasa

Penyearah Diode gelombang penuh tiga fasa menggunakan sistem jembatan dengan enam buah Diode  $R1$ ,  $R3$  dan  $R5$  katodanya disatukan sebagai terminal positif. Diode  $R4$ ,  $R6$  dan  $R2$  anodanya yang disatukan sebagai terminal negatif **gambar 10.27**. Tegangan DC yang dihasilkan memiliki enam pulsa yang dihasilkan oleh masing-masing Diode tsb. Tegangan DC yang dihasilkan halus karena tegangan riak (*ripple*) kecil dan lebih rata.



Gambar 10.27 : Penyearah Jembatan Gelombang Penuh 3 Fasa

Urutan konduksi dari keenam Diode dapat dilihat dari siklus gelombang sinusoida, dimana konduksi secara bergantian. Konduksi dimulai dari Diode  $R1+R6$  sepanjang sudut komutasi  $60^\circ$ . Berturut-turut disusul Diode  $R1+R2$ , lanjutnya Diode  $R3+R2$ , urutan keempat  $R3+R4$ , kelima  $R5+R4$  dan terakhir  $R5+R6$  **gambar 10.28**. Jelas dalam satu siklus gelombang tiga fasa terjadi enam kali komutasi dari keenam Diode secara bergantian dan bersama-sama. Apa yang terjadi ketika salah satu dari Diode tersebut rusak ?



Gambar 10.28 : Bentuk Gelombang Penyearah Penuh 3 Fasa

Persamaan tegangan dan arus penyearah Diode gelombang penuh:

$U_{di} = 1,35 \cdot U_1$	$U_{di}$	Tegangan searah ideal
	$U_d$	Tegangan searah
	$U_1$	Tegangan efektif
$I_z = \frac{I_d}{3}$	$I_z$	Arus melewati Diode
	$I_d$	Arus searah
$P_T = 1,1 \cdot P_d$	$P_T$	Daya transformator
	$P_d$	Daya arus searah

Tabel 10.1. Jenis Penyearah Diode

Jenis rangkaian	Penyearah satu-pulsa	Penyearah dua-pulsa jembatan	Penyearah tiga-pulsa, titik bintang	Penyearah enam-pulsa jembatan
Kode	E1U	B2U	M3U	B6U
Rangkaian				
Tegangan tanpa beban				
$\frac{V_{di}}{V_1}$	0,45	0,9	0,68	1,35
Faktor ripel	1,21	0,48	0,18	0,04
$\frac{P_T}{P_d}$	3,1	1,23	1,5	1,1
$I_z$	$I_d$	$\frac{I_d}{2}$	$\frac{I_d}{3}$	$\frac{I_d}{3}$

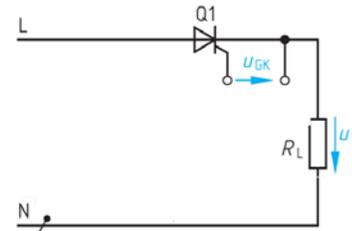
*V<sub>di</sub>: tegangan dc-tanpa beban, V<sub>1</sub>: tegangan ac, P<sub>T</sub>: daya trafo, P<sub>d</sub>: daya dc, V<sub>d</sub>: tegangan dc-berbeban, I<sub>d</sub>: arus dc, I<sub>z</sub>: arus yang mengalir melalui satu dioda*

### 10.8. Penyearah Terkendali Thyristor

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa, penyearah tak terkendali menghasilkan tegangan keluaran DC yang tetap. Bila dikehendaki tegangan keluaran yang bisa diubah-ubah, digunakan *Thyristor* sebagai pengganti dioda. Tegangan keluaran penyearah *Thyristor* dapat diubah-ubah atau dikendalikan dengan mengendalikan sudut penyalaan  $\alpha$  dari *Thyristor*. Penyalaan ini dilakukan dengan memberikan pulsa trigger pada gate *Thyristor*. Pulsa trigger dibangkitkan secara khusus oleh rangkaian trigger.

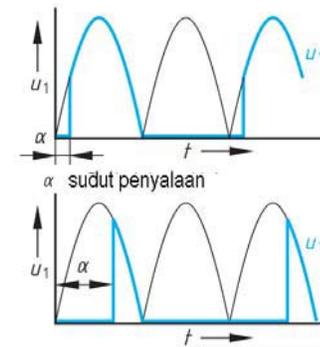
**10.8.1. Penyearah Thyristor Setengah Gelombang Satu Fasa**

Rangkaian penyearah *Thyristor* kelebihanannya tegangan outputnya bisa diatur, dengan mengatur sudut penyalaan gate *Thyristor*. Sebuah *Thyristor* Q1 dan sebuah beban resistif  $R_L$  dihubungkan dengan listrik AC ***gambar-10.29***. Pada gate diberikan pulsa penyulut  $\alpha$ , maka *Thyristor* akan konduksi dan mengalirkan arus ke beban. Dengan beban resistif  $R_L$  maka arus dan tegangan yang dihasilkan sephasa.



Gambar 10.29: Penyearah Terkendali 1/2 Gelombang

Pada gate *Thyristor* diberikan penyalaan sebesar  $\alpha$ , maka tegangan positif saja yang dilewatkan oleh *Thyristor* ***gambar-10.30*** Tegangan negatif di blok tidak dilewatkan, khususnya karena bebannya resistif  $R_L$ . Kondisinya berbeda jika beban mengandung induktor, dimana antara tegangan dan arus ada beda fasa.



Gambar 10.30 :Sudut Penyalaan dan Output Tegangan DC 1/2 Gelombang

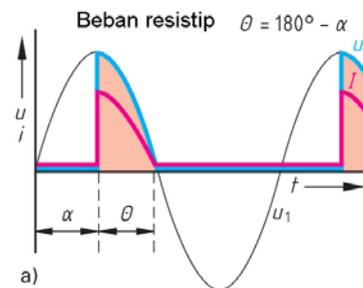
Pada beban resistif  $R_L$ , ketika sudut penyalaan  $\alpha$  diperbesar, tegangan output yang dihasilkan akan mengecil sesuai dengan sudut konduksi dari *Thyristor*.

Persamaan tegangan pada beban resistif setengah gelombang:

$$U_{d\alpha} = \frac{U}{2} (1 + \cos \alpha)$$

$U_{d\alpha}$  Tegangan searah terkendali  
 $U_{d0}$  Tegangan DC Diode  
 $U$  Tegangan efektif  
 $\alpha$  Sudut penyalaan gate

Pada beban resistif  $R_L$  akan dihasilkan tegangan dan arus yang sephasa ***gambar-10.31***. Dengan penyearah *Thyristor* setengah gelombang hanya gelombang positif dari sinusoida yang dilewatkan, gelombang negatif di blocking oleh *Thyristor*. Yang termasuk beban resistif, misalnya lampu pijar, pemanas heater, rice cooker.



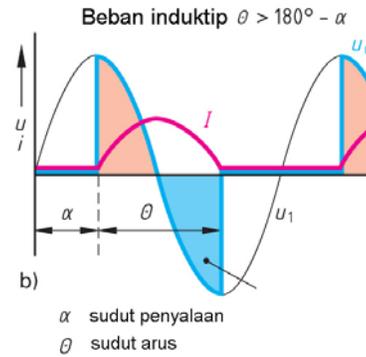
Gambar 10.31 : Tegangan dan Arus DC Beban Resistif

Untuk beban terpasang mengandung resistif-induktif, arus beban dengan tegangan tidak sephasa, saat *Thyristor* diberikan trigger  $\alpha$

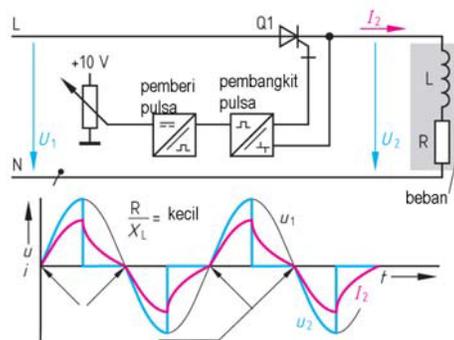
arus beban naik dan tidak segera mencapai nol saat tegangan berada dititik nol. *Thyristor* akan konduksi lebih lama sebesar sudut  $\theta$  dan pada beban muncul siklus tegangan negatif **gambar-10.32**. Beban yang mengandung resistif-induktif adalah beban motor.

Rangkaian pengaturan beban dengan *Thyristor* setengah gelombang dihubungkan dengan sumber tegangan AC, sisi beban mengandung resistif-induktif, misalnya beban motor DC. Terminal gate *Thyristor* dihubungkan dengan modul trigger, untuk daya kecil hubungan modul trigger ke gate *Thyristor* bisa langsung **gambar-10.33**.

Analisa gelombang yang dihasilkan *Thyristor* hanya konduksi saat tegangan positif saja, tegangan negatifnya diblok. Tetapi arus positif dan sebagian arus negatif dilakukan oleh *Thyristor*.



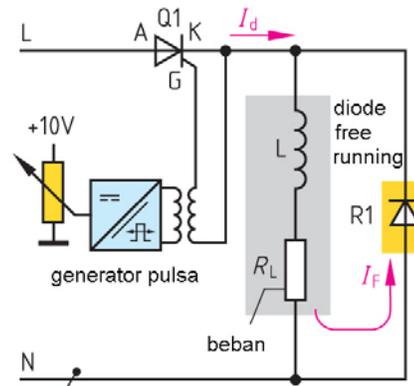
Gambar 10.32 : Tegangan dan Arus DC Beban Induktif



Gambar 10.33 : Modul Trigger Thyristor

Untuk daya yang lebih besar, gate dikopel dengannya sebagai isolasi rangkaian *Thyristor* dengan modul trigger **gambar-10.34**. Potensiometer modul penyulut trigger untuk mengatur sudut penyalaaan  $\alpha$ . Ada Diode R1 yang diparalel dengan beban yang disebut sebagai *free wheel Diode*.

Pada beban resistif-induktif ditambahkan sebuah Diode R1 (*free wheel Diode*). Saat *Thyristor* menuju OFF maka induktor akan membangkitkan tegangan induksi, *Diode free-wheel* akan mengalirkan tegangan induksi sehingga tidak merusak *Thyristor*. Pada beban resisitip-induksip, sudut pengaturan sudut  $\alpha$  untuk beban resistif-induktif efektif antara  $0^0$  sampai  $90^0$ .



Gambar 10.34 : Penyearah Thyristor dengan Diode

Grafik tegangan  $U_{d\alpha}$  fungsi penyalaaan sudut  $\alpha$ , untuk beban resistif dan beban induktif **gambar-10.35**. Beban resistif memiliki sudut pengaturan pulsa trigger

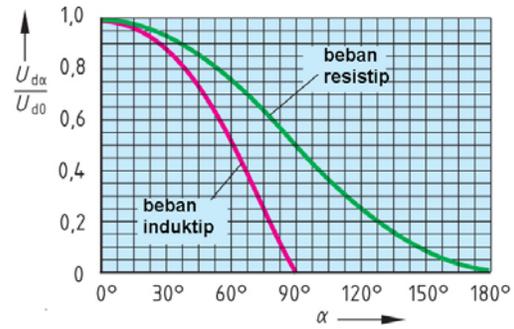
dari  $0^\circ$  sampai  $180^\circ$ . Untuk beban induktif sudut pengaturan pulsa trigger, direkomendasikan antara  $0^\circ$  sampai  $90^\circ$ .

**Contoh :** penyearah *Thyristor* dengan beban resistif. Tegangan input 100VAC. Hitung tegangan DC saat sudut penyalan  $\alpha = 0^\circ$  dan  $\alpha = 60^\circ$

**Jawaban :**

$$0^\circ: \frac{U_{d\alpha}}{U_{d0}} = 1 \Rightarrow U_{d0} \quad \alpha = 0^\circ \hat{=} 100 \text{ V}$$

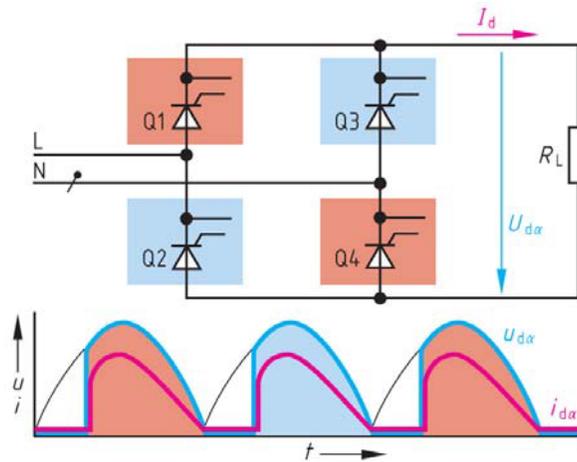
$$60^\circ: \frac{U_{d\alpha}}{U_{d0}} = 0,75 \Rightarrow U_{d0} \quad \alpha = 60^\circ \hat{=} 75 \text{ V}$$



Gambar 10.35 : Grafik Fungsi Penyalan Gate Thyristor

### 10.8.2. Penyearah *Thyristor* Gelombang Penuh Satu Fasa

Penyearah terkendali penuh satu fasa dengan empat buah *Thyristor* Q1, Q2, Q3 dan Q4 dalam hubungan jembatan **gambar-10.36**. Pasangan *Thyristor* adalah Q1-Q4 dan Q2-Q3, masing-masing diberikan pulsa penyulut pada sudut  $\alpha$  untuk siklus positif dan siklus negatif tegangan sumber. Dengan beban resistif  $R_L$ , pada sudut penyalan  $\alpha$  maka *Thyristor* Q1 dan Q4 akan konduksi bersamaan, dan pada tahap berikutnya menyusul *Thyristor* Q2 dan Q3 konduksi. Pada beban resistif  $R_L$ , bentuk tegangan searah antara tegangan dan arus se-fasa.



Gambar 10.36 : Penyearah Terkendali Jembatan 1 Fasa

Persamaan penyearah *Thyristor* gelombang penuh satu fasa beban resistif  $R_L$ , pengaturan sudut  $\alpha$  dari  $0^\circ$  sampai  $180^\circ$ .

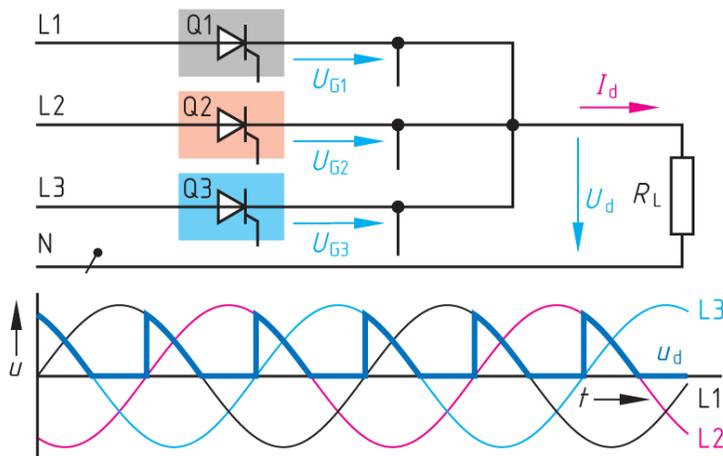
$U_{d\alpha} = 0,5 \cdot U_{do} (1 + \cos \alpha)$	$U_{d\alpha}$	Tegangan searah terkendali
$U_{do} = 0,9 \cdot U$	$U_{do}$	Tegangan DC Diode
	$U$	Tegangan efektif
	$\alpha$	Sudut penyalan gate

Untuk beban mengandung resistif dan induktif, pengaturan sudut  $\alpha$  dari  $0^\circ$  sampai  $90^\circ$  saja, berlaku persamaan tegangan sebagai berikut:

$U_{d\alpha} = 0,5 \cdot U_{do} \cos \alpha$	$U_{d\alpha}$	Tegangan searah terkendali
$U_{do} = 0,9 \cdot U$	$U_{do}$	Tegangan DC Diode.
	$U$	Tegangan efektif
	$\alpha$	Sudut penyalan gate

### 10.8.3. Penyearah Thyristor Setengah Gelombang Tiga Fasa

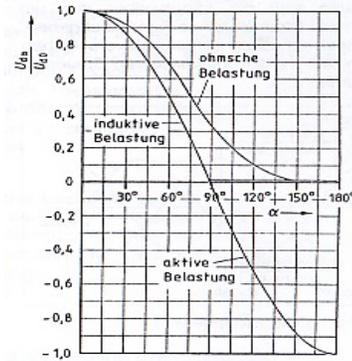
Rangkaian penyearah *Thyristor* setengah gelombang tiga fasa dengan tiga *Thyristor* Q1, Q2 dan Q3. Katode ketiga *Thyristor* disatukan menjadi terminal positif, terminal negatif dari kawat netral N, dengan beban resistif  $R_L$  **gambar-10.37**. Masing-masing *Thyristor* mendapatkan pulsa penyalan yang berbeda-beda melalui  $U_{G1}$ ,  $U_{G2}$ ,  $U_{G3}$ . Penyearah tiga fasa digunakan untuk mendapatkan nilai rata-rata tegangan keluaran yang lebih tinggi dengan frekuensi lebih tinggi dibanding penyearah satu fasa. Aplikasi dipakai pada pengaturan motor DC dengan daya tinggi. Tegangan DC yang dihasilkan melalui beban resistif  $R_L$ .



Gambar 10.37 : Penyearah Thyristor ½ Gelombang 3 Fasa

Arus searah negatif kembali ke sekunder trafo melalui kawat N. Tegangan DC yang dihasilkan mengandung *ripple*. Karena tiap fase tegangan masukan berbeda  $120^\circ$ , maka pulsa penyulutan diberikan dengan beda fase  $120^\circ$ .

Pada beban resistif, pengaturan sudut penyalan trigger  $\alpha$  dari  $0^\circ$  sampai  $150^\circ$ . Untuk beban induktif pengaturan sudut penyalan  $\alpha$  antara  $0^\circ$  sampai  $90^\circ$  **gambar-10.38**.



Gambar 10.38 : Grafik Pengaturan Sudut Penyalan

Persamaan tegangan pada beban resistif,

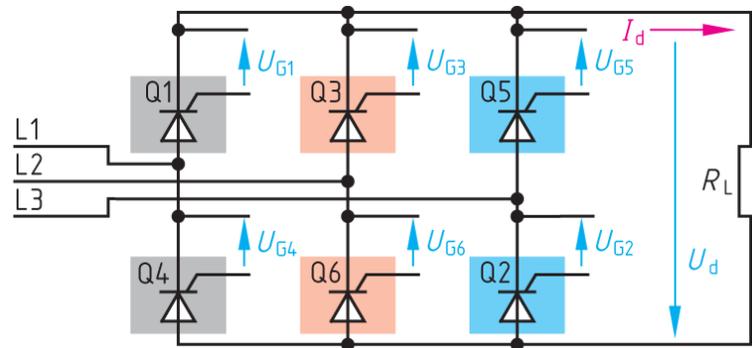
$$U_{da} = U_{do} \cdot \cos \alpha$$

$$U_{do} = 0,676 \cdot U$$

- $U_{da}$  Tegangan searah terkendali
- $U_{do}$  Tegangan DC Diode
- $U$  Tegangan efektif
- $\alpha$  Sudut penyalan *gate*

**10.8.4. Penyearah Thyristor Gelombang Penuh Tiga Fase**

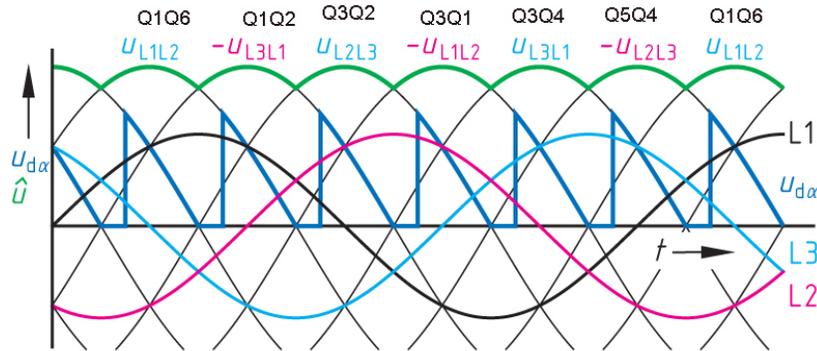
Penyearah *Thyristor* tiga fase terdiri atas enam buah *Thyristor* Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, dan Q6. Katoda dari Diode Q1, Q3 dan Q5 disatukan sebagai terminal positif, dan anode dari *Thyristor* Q4, Q6 dan Q2 disatukan menjadi terminal negatif. Masing-masing *Thyristor* mendapatkan pulsa penyalan yang berbeda-beda melalui  $U_{G1}, U_{G2}, U_{G3}, U_{G4}, U_{G5},$  dan  $U_{G6}$ . Sebuah beban resistif  $R_L$  sebagai beban DC **gambar- 10.39**.



Gambar 10.39 : Penyearah Terkendali 3 Fase

Untuk melihat urutan konduksi dari keenam *Thyristor* dapat dilihat dari gelombang tiga fase **gambar-10.40**. Contoh ketika tegangan DC terbentuk dari puncak gelombang  $U_{L1L2}$  yang konduksi *Thyristor* Q1+Q6, berikutnya pada

puncak tegangan  $-U_{L3L1}$  yang konduksi *Thyristor* Q1+Q2 dan seterusnya. Apa yang terjadi jika salah satu dari keenam *Thyristor* tersebut mati (misalnya Q1) tidak bekerja, dan apa yang terjadi ketika *Thyristor* Q1 dan Q3 tidak bekerja? Berikan jawabannya dengan melihat gelombang sinusoida di bawah ini.



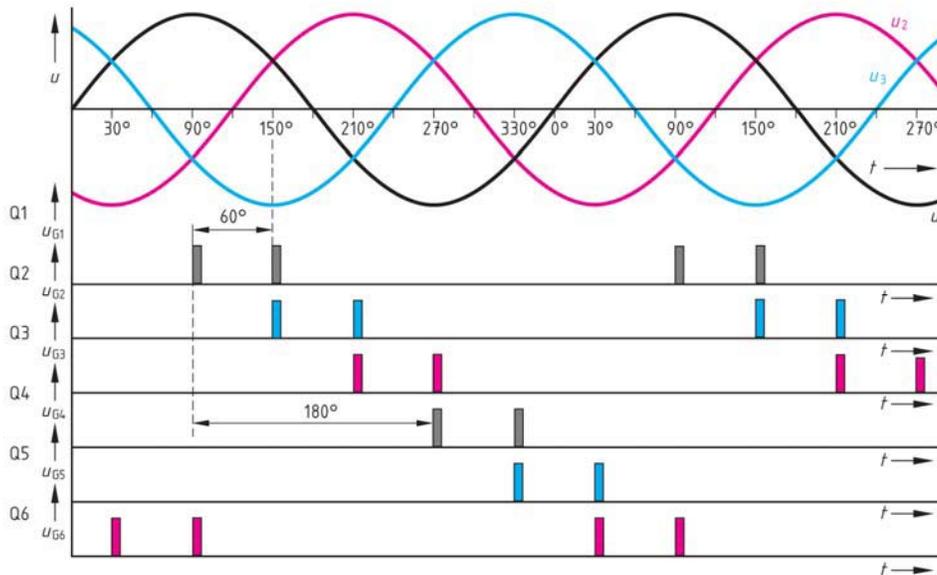
Gambar 10.40: Bentuk Tegangan DC Penyearah 3 Fasa

Persamaan tegangan pada beban resistif, pengaturan sudut  $\alpha$  dari  $0^\circ$  sampai  $150^\circ$ .

$$U_{d\alpha} = U_{do} \cdot \cos \alpha$$

$$U_{do} = 1,35 \cdot U$$

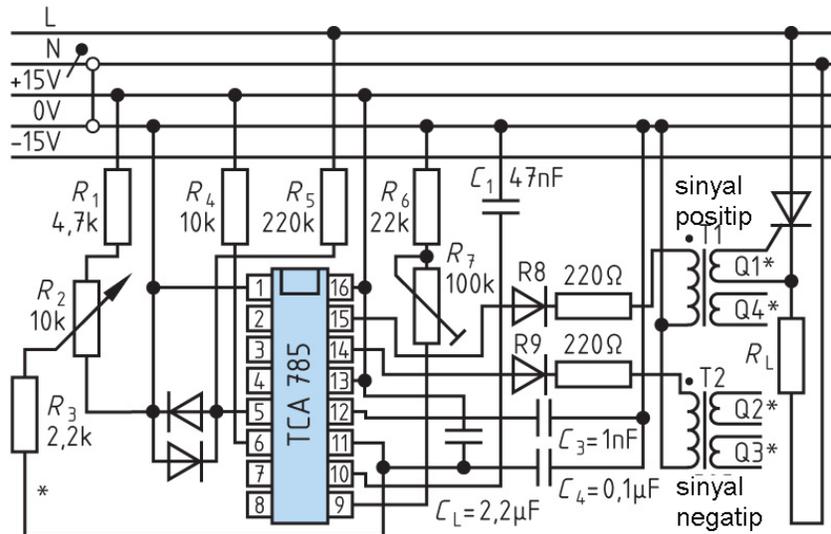
- $U_{d\alpha}$  Tegangan searah terkendali
- $U_{do}$  Tegangan DC Diode
- $U$  Tegangan efektif
- $\alpha$  Sudut penyalan gate



Gambar 10.41 : Urutan Penyalan Gate-Thyristor 3 Fasa

## 10.9. Modul Trigger TCA 785

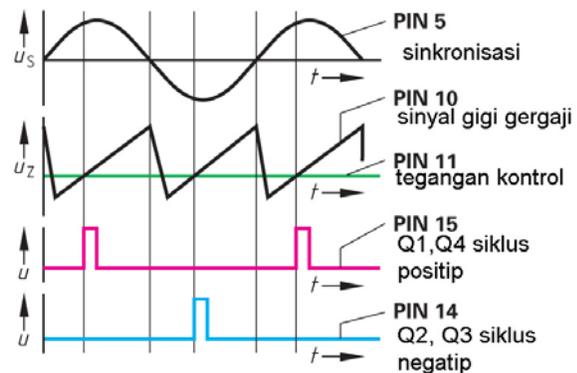
Rangkaian modul trigger dalam bentuk chip TCA-785 sudah tersedia dan dapat digunakan secara komersial untuk pengaturan daya sampai 15 kW dengan tegangan 3 x 380V **gambar-10.42**. Rangkaian ini terdiri dari potensio R2 yang berguna untuk mengatur sudut penyalaan  $\alpha$ . Tegangan pulsa trigger dari kaki 14 dan 15 chip TCA 785. Untuk pengaturan daya besar dipakai trafo pulsa T1 dan T2. Tiap trafo pulsa memiliki dua belitan sekunder, untuk T1 untuk melayani *Thyristor* Q1 dan Q4, sedangkan T2 melayani *Thyristor* Q2 dan Q3.



Gambar 10.42 : Rangkaian Pembangkit Pulsa Chip TCA785

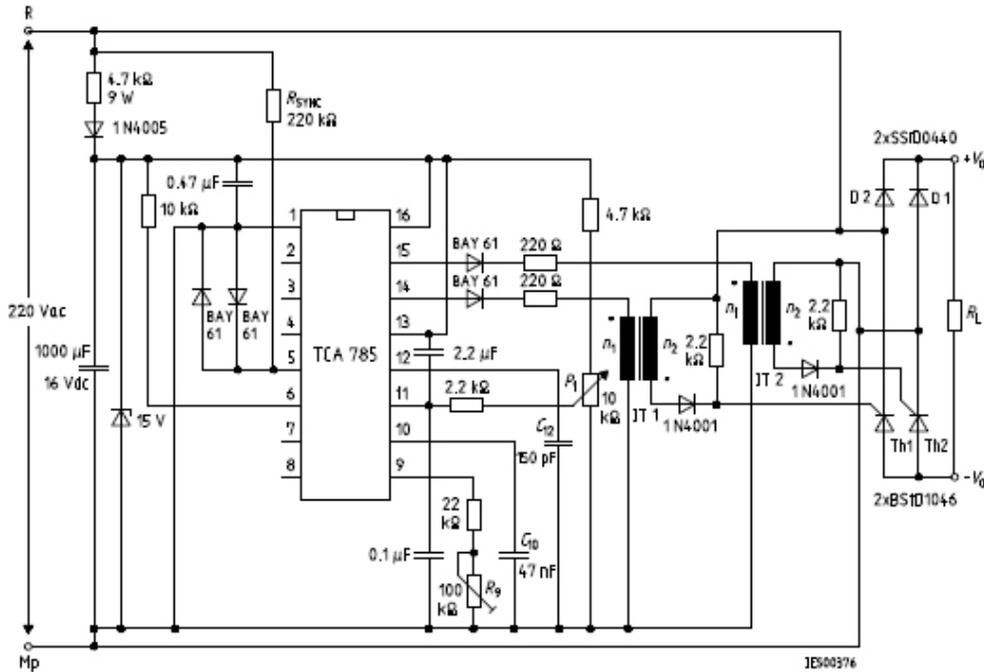
Dalam modul chip TCA 785 ada beberapa kaki yang harus diperiksa jika kaki output 14 dan kaki 15 tidak menghasilkan tegangan pulsa **gambar-10.43**.

- Kaki 15 sebagai sinkronisasi mendapat tegangan sinusoida dari jala-jala.
- Kaki 10 dan 11, menghasilkan tegangan gigi gergaji.
- Kaki 15 tegangan output pulsa untuk trafo pulsa T1.
- Kaki 14 tegangan output pulsa untuk trafo pulsa T2.



Gambar 10.43 : Bentuk Gelombang Chip TCA785

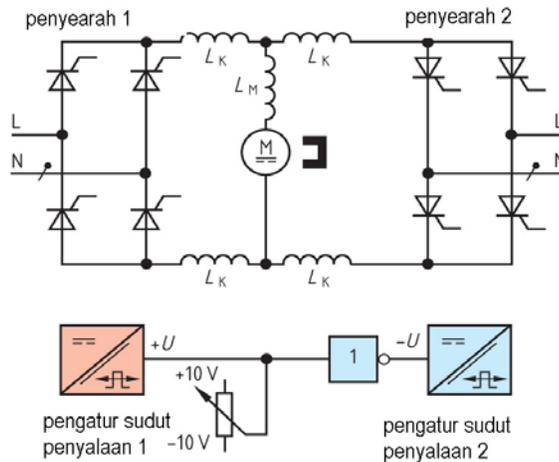
Rangkaian lengkap terdiri atas rangkaian daya dengan penyearah asimetris gelombang penuh dengan dua Diode dan dua *Thyristor*. Daya yang mampu dikendalikan sebesar 15 kW beban DC **gambar 10.44**.



Gambar 10.44 : Rangkaian Daya 1 Fasa Beban DC 15 Kw

**10.10. Aplikasi Elektronika Daya**

Aplikasi penyearah *Thyristor* gelombang penuh satu fasa untuk mengendalikan putaran motor DC untuk putaran kekanan dan putaran ke kiri. Terdapat dua kelompok penyearah *Thyristor*, penyearah satu jika dijalankan motor DC akan berputar ke kanan. Ketika penyearah kedua dijalankan maka motor DC akan berputar ke kiri. Untuk mengatur kecepatan motor, dengan mengatur besarnya tegangan ke terminal motor.



Gambar 10.45 : Aplikasi Pengendalian putaran Motor DC

Potensiometer pada modul trig-ger mengatur sudut penyalan *Thyristor*, maka putaran motor dapat diatur dari minimal menuju putaran nominal. Ketika potensiometer posisi di tengah (tegangan nol), motor akan berhenti. Ketika potensiometer berharga positif, penyearah pertama yang bekerja dan motor DC putarannya kekanan. Saat potensiometer berharga negatif, penyearah kedua yang bekerja dan motor berputar ke kiri.

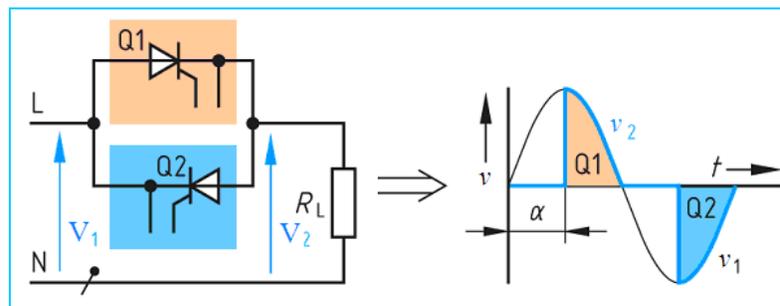
### 10.10.1. Pengendali Tegangan AC

Teknik pengontrolan fasa memberikan kemudahan dalam sistem pengendalian AC. Pengendali tegangan saluran AC digunakan untuk mengubah-ubah harga rms tegangan AC yang dicatukan ke beban dengan menggunakan *Thyristor* sebagai saklar.

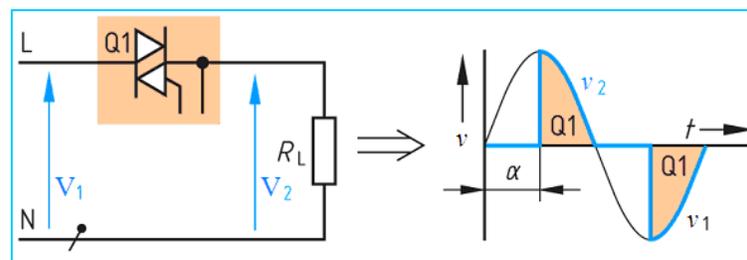
Penggunaan alat ini, antara lain, meliputi:

- Kontrol penerangan
- Kontrol alat-alat pemanas
- Kontrol kecepatan motor induksi

Rangkaian pengendalian dapat dilakukan dengan menggunakan dua-*Thyristor* yang dirangkai anti-paralel **gambar 10.46 (a)** atau menggunakan *Triac* **gambar 10.46 (b)**.



a). *Thyristor Anti Paralel*



b). *TRIAC*

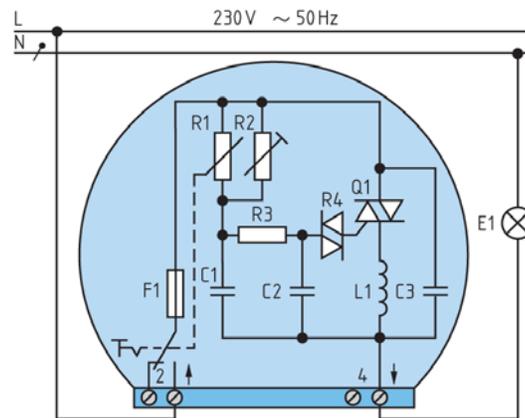
Gambar 10.46 : Bentuk Dasar Pengendali Tegangan AC

Penggunaan dua *Thyristor* anti paralel memberikan pendalian tegangan AC secara simetris pada kedua setengah gelombang pertama dan setengah gelombang berikutnya. Penggunaan *Triac* merupakan cara yang paling simpel, efisien dan handal. *Triac* merupakan komponen dua-arah sehingga untuk mengendalikan tegangan AC pada kedua setengah gelombang cukup dengan satu pulsa trigger. Barangkali inilah yang membuat rangkaian pengendalian jenis ini sangat populer di masyarakat. Keterbatasannya terletak pada kapasitasnya yang masih terbatas dibandingkan bila menggunakan *Thyristor*.

Dari **gambar 10.46** jika tegangan sinusoidal dimasukkan pada rangkaian seperti pada gambar, maka pada setengah gelombang pertama *Thyristor* Q1 mendapat bias maju, dan Q2 dalam keadaan sebaliknya. Kemudian pada setengah gelombang berikutnya, Q2 mendapat bias maju, sedangkan Q1 bias mundur. Agar rangkaian dapat bekerja, ketika pada setengah gelombang pertama Q1 harus diberi sinyal penyalaan pada gatena dengan sudut penyalaan, misalnya  $\alpha$ . Seketika itu Q1 akan konduksi. Q1 akan tetap konduksi sampai terjadi perubahan arah (komutasi), yaitu tegangan menuju nol dan negatif. Setelah itu, pada setengah periode berikutnya, Q2 diberi trigger dengan sudut yang sama, proses yang terjadi sama persis dengan yang pertama. Dengan demikian bentuk gelombang keluaran pada seperti yang ditunjukkan pada gambar.

### 10.10.2. Pengendalian Dimer

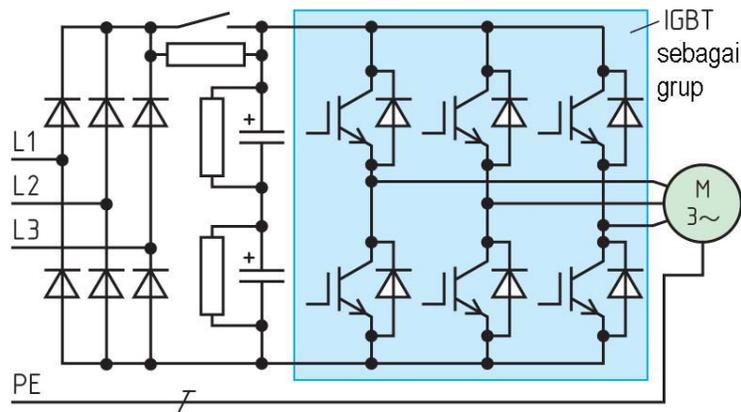
Seperti yang telah disinggung sebelumnya, bahwa dua *Thyristor* anti-paralel dapat digantikan dengan sebuah *Triac*. Bedanya di sini hanya pada gatena, yang hanya ada satu gate saja. Namun kebutuhan sinyal trigger sama, yaitu sekali pada waktu setengah periode pertama dan sekali pada waktu setengah periode berikutnya. Sehingga hasil pengendalian tidak berbeda dari yang menggunakan *Thyristor* anti-paralel **gambar 10.47**.



Gambar 10.47 : Rangkaian Dimmer dengan TRIAC

Pengendalian yang bisa dilakukan dengan menggunakan metoda ini hanya terbatas pada beban fasa-satu saja. Untuk beban yang lebih besar, metode pengendalian, kemudian dikembangkan lagi menggunakan sistem fasa-tiga, baik yang setengah gelombang maupun gelombang penuh (rangkai jembatan).

### 10.10.3. Aplikasi IGBT untuk Inverter

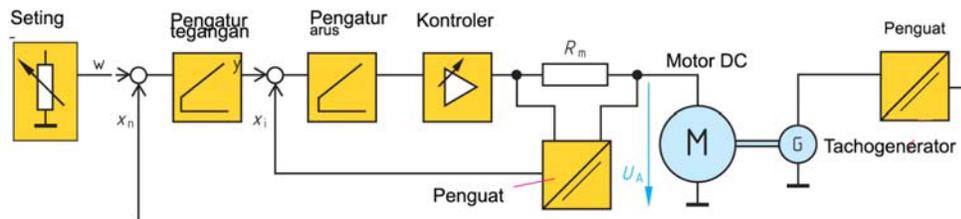


Gambar 10.48 : Aplikasi IGBT Untuk Kontrol Motor Induksi 3 Fasa

Rangkaian *Cycloconverter* **gambar-10.48** dimana tegangan AC 3 fasa disearahkan menjadi tegangan DC oleh enam buah Diode. Selanjutnya sembilan buah IGBT membentuk konfigurasi yang akan menghasilkan tegangan AC 3 fasa dengan tegangan dan frekuensi yang dapat diatur, dengan mengatur waktu ON oleh generator PWM. Rangkaian VVVF ini dipakai pada KRL merk HOLEC di Jabotabek.

### 10.10.4. Pengaturan Kecepatan Motor DC

Pemakaian motor DC di industri sangat banyak, salah satu alasannya karena motor DC mudah diatur kecepatannya. Salah satu pemakaiannya di Industri kertas, industri tekstil dsb. Blok diagram pengaturan motor DC seperti pada gambar 10.20.



Gambar 10.49. Blok Diagram Pengaturan Kecepatan Motor DC

### Cara kerja:

1. Bagian setting mengatur posisi potensiometer untuk mengatur tegangan 10 Volt pada 1000 Rpm.
2. Motor DC akan berputar setelah dihubungkan dengan suply DC sampai putaran mendekati 1000 Rpm, misalkan 1050 Rpm.
3. Tachogenerator akan mendeteksi kecepatan motor DC, dan mengubah menjadi tegangan 10,05 Volt.
4. Tegangan 10,05 Volt dibandingkan dengan tegangan setting 10 V, diperoleh selisih  $-0,05V$  ( $10V - 10,05V$ ).
5. Selisih tegangan ini disebut sebagai kesalahan (error) yang menjadi input pengatur tegangan (penguatan 10X), hasilnya  $10 \times 0,05V = 0,5V$ .
6. Tegangan 0,5V akan menjadi input Kontroller yang mengatur tegangan yang masuk ke rangkaian jangkar motor DC, akibatnya putaran menurun sesuai dengan setting putarn 1000 Rpm
7. Kondisi akan terjadi secara terus menerus yang menghasilkan putaran motor DC tetap konstan.

### 10.11. Rangkuman

- Ada empat konverter daya yang terbagi dalam empat kuadran.
  1. Kuadran 1 disebut penyearah
  2. Kuadran 2 disebut DC *Chopper*
  3. Kuadran 3 disebut Inverter
  4. Kuadran 4 disebut AC-AC Konverter
- Komponen elektronika daya yang banyak dipakai meliputi Diode, Transistor dan Thyristor termasuk Triac.
- Diode yang dipakai elektronika daya memiliki syarat menahan tegangan anoda-katode ( $V_{AK}$ ) besar, dapat melewatkan arus anoda ( $I_A$ ) yang besar, kemampuan menahan perubahan arus sesaat  $di/dt$  serta kemampuan menahan perubahan tegangan sesaat  $dv/dt$ .
- Transistor daya harus memenuhi persyaratan memiliki tegangan kolektor-emiter ( $V_{CEO}$ ) yang besar, arus kolektor ( $I_C$ ) terpenuhi, penguatan DC ( $\beta$ ) yang besar, mampu menahan perubahan tegangan sesaat  $dv/dt$ .
- Thyristor mampu menahan tegangan anoda-katoda ( $V_{AK}$ ), mengalirkan arus anoda yang besar ( $I_A$ ), menahan perubahan arus sesaat  $di/dt$ , dan mampu menahan perubahan tegangan sesaat  $dv/dt$
- *Thyristor* memiliki tiga kaki, yaitu Anoda, Katoda dan Gate, jenisnya ada P gate dan N-gate.
- *Thyristor* memiliki parameter penting, yaitu : tegangan gate-katode, arus gate minimal, agar *Thyristor* tetap posisi ON diperlukan arus holding.
- Aplikasi *Thyristor* yang paling banyak sebagai penyearah tegangan AC ke DC, atau dipakai dalam inverter.

- IGBT memiliki kesamaan dengan Transistor bipolar, perbedaannya pada Transistor bipolar arus basis  $I_B$  yang diatur. Sedangkan pada IGBT yang diatur adalah tegangan gate ke emitor  $U_{GE}$ .
- Rancangan konverter daya mengandung lima elemen, yaitu (1) sumber energi, (2) komponen daya, (3) piranti pengaman dan monitoring, (4) sistem kontrol loop tertutup dan (5) beban.
- Ada empat tipe penyearah terdiri penyearah setengah gelombang dan gelombang penuh satu phasa dan setengah gelombang tiga phasa dan gelombang penuh tiga phasa.
- Penyearah tanpa kendali dengan Diode:
  1. Tegangan setengah gelombang 1 phasa  $U_{di}=0,45.U_1$
  2. Tegangan gelombang penuh 1 phasa  $U_{di}=0,9 . U_1$
  3. Tegangan setengah gelombang 3 phasa  $U_{di}=0,68 . U_1$
  4. Tegangan gelombang penuh 3 phasa  $U_{di}=1,35 . U_1$
- Penyearah terkendali dengan *Thyristor* :
  1. Tegangan setengah gelombang 1 phasa  $U_{d\alpha} = \frac{U}{2} (1+ \cos \alpha)$
  2. Tegangan gelombang penuh 1 phasa  $U_{d\alpha} = 0,5.U_{do} (1+ \cos \alpha)$   
 $U_{do} = 0,9.U$
  3. Tegangan setengah gelombang 3 phasa  $U_{d\alpha} = U_{do} . \cos \alpha$   
 $U_{do} = 0,676 . U$
  4. Tegangan gelombang penuh 3 phasa  $U_{d\alpha} = U_{do} . \cos \alpha$   
 $U_{do} = 1,35.U$
- Modul trigger chip TCA-785 dipakai untuk triger sistem satu phasa maupun tiga phasa.
- Pengaturan daya AC dipakai *Thyristor* terpasang antiparalel, dengan mengatur sudut penyalaan daya beban AC dapat dikendalikan.

## 10.12. Soal-soal

1. Jelaskan cara kerja :
  - a). Penyearah
  - b). DC Chopper
  - c). Inverter
  - d). AC-AC Konverter
2. Diode BY127 dipakai untuk penyearah gelombang penuh dari sebuah trafo 220/12 Volt, gambarkan skematik pengawatannya dan gambar gelombang sinus dan gelombang DC nya.
3. Transistor jenis PNP, difungsikan sebagai saklar elektronik. Buatlah gambar skematiknya dan jelaskan cara kerja saklar elektronik.

## Elektronika Daya

---

4. Transistor BC 107, diberikan tegangan sumber  $U_B = 12 \text{ V}$ . Membutuhkan tegangan bias  $U_{BE} = 0,62 \text{ V}$  dengan arus basis  $I_B = 0,3 \text{ mA}$ . Hitunglah a) nilai tahanan bias sendiri  $R_V$  dan b) nilai tahanan pembagi tegangan R1 dan R2.
5. Transistor BC 107 difungsikan gerbang NAND, tegangan sinyal 1  $U_1 = 3,4 \text{ V}$ , tegangan LED  $U_F = 1,65 \text{ V}$ , arus mengalir pada LED  $I_F = 20 \text{ mA}$ , tegangan  $U_{BE} = 0,65 \text{ V}$ , dan  $B_{min} = 120$ , tegangan saturasi  $U_{CEsat} = 0,2 \text{ V}$  dan faktor penguatan tegangan  $U = 3$ . Tentukan besarnya tahanan RC dan RV ?
6. Penyearah gelombang penuh diberikan tegangan 24VAC, dan arus 2,0A, tegangan *ripple*  $u_p = 1,5 \text{ V}$ , frekuensi *ripple*  $f_p = 100 \text{ Hz}$ , tegangan *cut-in* Diode  $U_f = 0,7 \text{ V}$ . Hitunglah: a) Faktor daya transformator b) Berapa besarnya tegangan AC c) Tentukan besarnya kapasitas kapasitor.
7. Penyearah dengan *Thyristor* gelombang penuh satu phasa dipasang pada tegangan 220 VAC. Hitung tegangan DC yang dihasilkan pada sudut pengaturan  $\alpha = 0 - 60^\circ$ .

# **BAB 11**

## **SISTEM PENGAMANAN BAHAYA LISTRIK**

### **Daftar Isi :**

11.1. Sistem Pengamanan Bahaya Listrik .....	11-2
11.2. Kode International Protection .....	11-4
11.3. Jenis Gangguan Listrik .....	11-7
11.4. Tindakan Pengamanan untuk Keselamatan .....	11-8
11.5. Proteksi Tegangan Ekstra Rendah .....	11-9
11.6. Proteksi dengan Isolasi Bagian Aktif .....	11-10
11.7. Proteksi dengan Rintangan .....	11-11
11.8. Proteksi dari Sentuhan Tidak Langsung .....	11-11
11.9. Jenis Sistem Distribusi .....	11-12
11.10. Sistem Pembumian TN .....	11-13
11.11. Pengukuran Pengaman Sistem Pembumian TN .....	11-14
11.12. Proteksi Gawai Proteksi Arus Sisa (ELCB) .....	11-15
11.13. Pengukuran Pengaman Sistem Pembumian TT .....	11-17
11.14. Pengukuran Pengaman Sistem Pembumian IT .....	11-18
11.15. Proteksi dengan Isolasi Ganda .....	11-19
11.16. Proteksi lokasi tidak Konduktif .....	11-20
11.17. Proteksi pemisahan Sirkuit Listrik .....	11-21
11.18. Pengukuran Tahanan Pembumian .....	11-22
11.19. Pengukuran Tahanan Isolasi Lantai dan Dinding .....	11-23
11.20. Pengujian Sistem Pembumian TN .....	11-24
11.21. Pengukuran Tahanan Pembumian dengan Voltmeter dan Ampermeter .....	11-24
11.22. Pengukuran Arus Sisa dan Tegangan pada ELCB.....	11-25
11.23. Rangkuman .....	11-25
11.24. Soal-soal .....	11-27

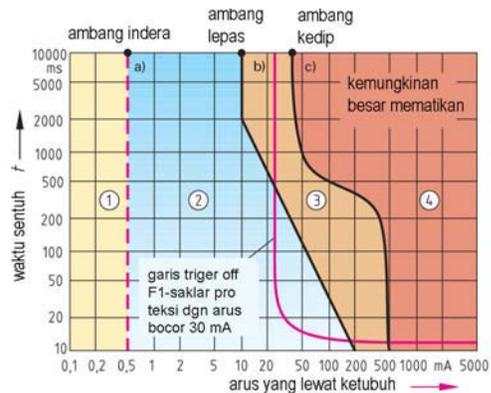
**11.1. Sistem Pengamanan Bahaya Listrik**

Pernah tersengat aliran listrik PLN 220V ? jika ya pasti sangat mengagetkan. Bahkan beberapa kasus tersengat listrik bisa berakibat pada kematian. Mengapa tegangan listrik 12 Volt pada akumulator tidak menyengat dan membahayakan manusia ? Tubuh manusia memiliki batas aman dialiri listrik, beberapa penelitian menyebutkan sampai dengan arus listrik 50mA adalah batas aman bagi manusia.

Jantung sebagai organ tubuh yang paling rentan terhadap pengaruh arus listrik, ada empat batasan **gambar-11.1**. Daerah 1 (0,1 sd 0,5mA) jantung tidak terpengaruh sama sekali bahkan dalam jangka waktu lama. Daerah 2 (0,5 sd 10 mA) jantung bereaksi dan rasa kesemutan muncul dipermukaan kulit. Diatas 10mA sampai 200mA jantung tahan sampai jangka waktu maksimal 2 detik saja. Daerah 3 (200 sd 500mA) Jantung merasakan sengatan kuat dan terasa sakit, jika melewati 0,5 detik masuk daerah bahaya. Daerah 4 (diatas 500mA) jantung akan rusak dan secara permanen dapat merusak sistem peredaran darah bahkan berakibat kematian.

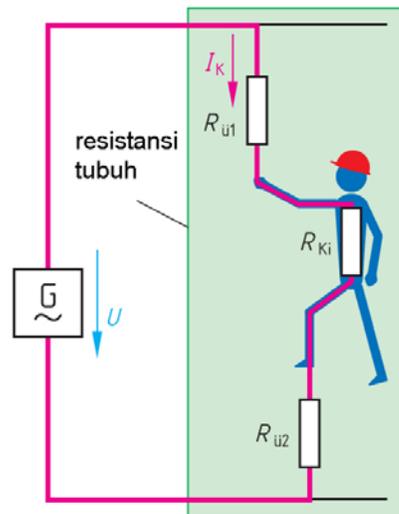
Model terjadinya aliran ketubuh manusia **gambar-11.2**, sumber listrik AC mengalirkan arus ke tubuh manusia sebesar  $I_k$ , melewati tahanan sentuh tangan  $R_{u1}$ , tubuh manusia  $R_{ki}$  dan tahanan pijakan kaki  $R_{u2}$ . Tahanan tubuh manusia rata-rata  $1000\Omega$ , arus yang aman tubuh manusia maksimum 50mA, maka besarnya tegangan sentuh adalah sebesar :

$$U_B = R_k \cdot I_k = 1000\Omega \times 50 \text{ mA} = 50 \text{ V.}$$



daerah	aksi tubuh
①	tidak ada reaksi
②	tidak berbahaya
③	berbahaya untuk jantung
④	serangan jantung

Gambar 11.1 : Grafik bahaya arus listrik



- $R_{u1}$  resistansi kawat-tubuh
- $R_{ki}$  resistansi dalam tubuh
- $R_{u2}$  resistansi tubuh-kawat
- $R_k$  resistansi tubuh

$$R_k = R_{u1} + R_{ki} + R_{u2}$$

Gambar 11.2 : Aliran listrik sentuhan langsung

Terjawab mengapa tegangan Akumulator 12V tidak menyengat saat dipegang terminal positif dan terminal negatifnya, karena tubuh manusia baru merasakan pengaruh tegangan listrik diatas 50V. Faktor yang berpengaruh ada dua, yaitu besarnya arus mengalir ketubuh dan lama waktunya menyentuh.

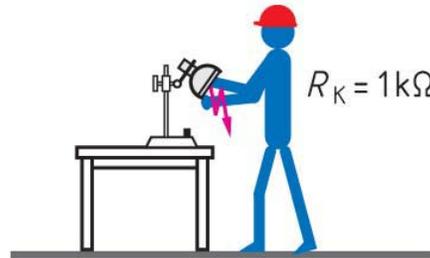
Tubuh manusia rata-rata memiliki tahanan  $R_k$  sebesar  $1000\Omega = 1k\Omega$ , tangan menyentuh tegangan PLN 220V **gambar-11.3**, arus yang mengalir ketubuh besarnya :

$$I_k = U/R_k = 220V/1000\Omega = 220mA$$

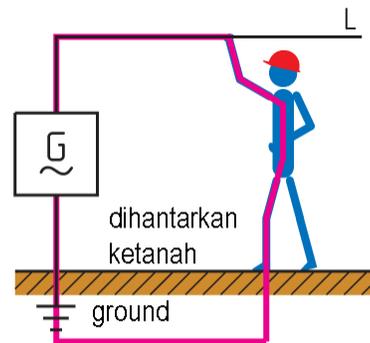
Arus  $I_k$  sebesar 200mA dalam hitungan milidetik tidak membahayakan jantung, tetapi diatas 0,2 detik sudah berakibat fatal bisa melukai bahkan bisa mematikan.

Tegangan sentuh bisa terjadi dengan dua cara, cara pertama tangan orang menyentuh langsung kawat beraliran listrik **gambar-11.4a**. Cara kedua tegangan sentuh tidak langsung, ketika terjadi kerusakan isolasi pada peralatan listrik dan orang menyentuh peralatan listrik tersebut yang bersangkutan akan terkena bahaya tegangan sentuh **gambar-11.4b**. Kerusakan isolasi bisa terjadi pada belitan kawat pada motor listrik, generator atau transformator. Isolasi yang rusak harus diganti karena termasuk kategori kerusakan permanen.

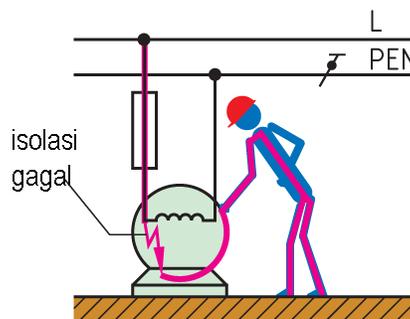
Bahaya listrik akibat tegangan sentuh langsung dan tidak langsung, keduanya sama berbahayanya. Tetapi dengan tindakan pengamanan yang baik, akibat tegangan sentuh yang berbahaya dapat diminimalkan. Kawat sebaiknya berisolasi sehingga bila tersentuh tidak membahayakan, peralatan listrik dipasang pentanahan yang baik, sehingga ketika terjadi arus bocor akan disalurkan ke tanah dan tidak membahayakan manusia.



Gambar 11.3 : Tahanan tubuh manusia



Gambar 11.4a : Tegangan sentuh langsung



Gambar 11.4b : Tegangan sentuh tidak langsung

11.2. Kode International Protection

klas proteksi	simbol	pemakaian
I		konduktor pengaman ke ground contoh body motor .
II		isolator proteksi ganda contoh mesin bor tangan
III		tegangan rendah contoh mainan anak2

Gambar 11.5 : Simbol pengamanan pada nameplate

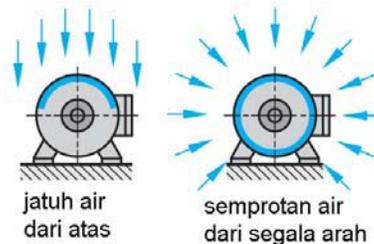
Peralatan listrik pada *name plate* tertera simbol yang berhubungan dengan tindakan pengamanan **gambar-11.5**. Klas I memberikan keterangan bahwa badan alat harus dihubungkan dengan pentanahan. Klas II menunjukkan alat dirancang dengan *isolasi ganda* dan aman dari tegangan sentuh. Klas III peralatan listrik yang menggunakan tegangan rendah yang aman, contoh mainan anak-anak.

Motor listrik bahkan dirancang oleh pabriknya dengan kemampuan tahan terhadap siraman langsung air **gambar-11.6**. Motor listrik jenis ini tepat digunakan di luar bangunan tanpa alat pelindung dan tetap bekerja normal dan tidak berpengaruh pada kinerjanya. Name plate motor dengan **IP 54**, yang menyatakan proteksi atas masuknya debu dan tahan masuknya air dari arah vertikal maupun horizontal.



Gambar 11.6 : Motor listrik tahan dari siraman air

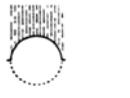
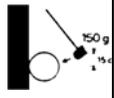
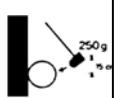
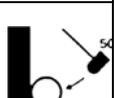
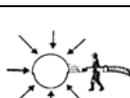
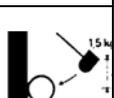
Ada motor listrik dengan proteksi ketahanan masuknya air dari arah vertikal saja **gambar-11.7a**, sehingga cairan arah dari samping tidak terlindungi. Tapi juga ada yang memiliki proteksi secara menyeluruh dari segala arah cairan **gambar-11.7b**. Perbedaan rancangan ini harus diketahui oleh teknisi karena berpengaruh pada ketahanan dan umur teknik motor, disamping harganya juga berbeda.



Gambar 11.7 : Motor listrik tahan siraman air vertikal dan segala arah

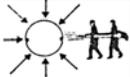
Kode IP (*International Protection*) peralatan listrik menunjukkan tingkat proteksi yang diberikan oleh selungkup dari sentuhan langsung ke bagian yang berbahaya, dari masuknya benda asing padat dan masuknya air. Contoh IP X1 artinya angka X menyatakan tidak persyaratan proteksi dari masuknya benda asing padat. Angka 1 menyatakan proteksi tetesan air vertikal. Contoh IP 5X, angka 5 proteksi masuknya debu, angka X tidak ada proteksi masuknya air dengan efek merusak. **Tabel 11.1.** merupakan contoh simbol Indek proteksi alat listrik yang dinyatakan dengan gambar.

Tabel 11.1. Contoh Simbol Indek Proteksi Alat Listrik

Digit kesatu : Proteksi terhadap benda padat			Digit kedua : Proteksi terhadap zat cair			Digit ketiga : Proteksi terhadap benturan mekanis		
IP	Test		IP	Test		IP	Test	
0		Tanpa proteksi	0		Tanpa proteksi	0		Tanpa proteksi
1		Proteksi terhadap benda padat lebih besar 50 mm (contoh, kontak dengan tangan)	1		Proteksi terhadap air yang jatuh ke bawah / vertikal (kondurasi)	1		Proteksi terhadap benturan dengan energi 0,225 joule
2		Proteksi terhadap benda padat lebih besar 12 mm (contoh jari tangan)	2		Proteksi terhadap air sampai dengan 15° dari vertikal	2		Proteksi terhadap benturan dengan energi 0,375 joule
3		Proteksi terhadap benda padat lebih besar 2,5 mm (contoh penghantar kabel)	3		Proteksi terhadap jatuhnya hujan sampai 60° dari vertikal	3		Proteksi terhadap benturan dengan energi 0,5 joule
4		Proteksi terhadap benda padat lebih besar 1 mm (contoh alat kabel kecil)	4		Proteksi terhadap semprotan air dari segala arah	5		Proteksi terhadap benturan dengan energi 2 joule
5		Proteksi terhadap debu (tidak ada lapisan/enda pan yang membahayakan)	5		Proteksi terhadap semprotan air yang kuat dari segala arah	7		Proteksi terhadap benturan dengan energi 6 joule
		Proteksi	6		Proteksi	9		Proteksi



## Sistem Pengamanan Bahaya Listrik

Digit kesatu : Proteksi terhadap benda padat			Digit kedua : Proteksi terhadap zat cair			Digit ketiga : Proteksi terhadap benturan mekanis		
IP	Test		IP	Test		IP	Test	
6		terhadap debu secara keseluruhan			terhadap semprotan air bertekanan berat			terhadap benturan dengan energi 20 joule
			7		Proteksi terhadap pengaruh dari pencelupan			
			8		Proteksi terhadap pengaruh dari pencelupan di bawah tekanan			

Tabel 11.2. Kode IP XX

Angka pertama X, proteksi masuknya benda asing padat	Angka kedua X, proteksi air
0 Tanpa proteksi	0 tanpa proteksi
1 diameter $\geq$ 50 mm	1 tetesan air vertikal
2 diameter $\geq$ 12,5 mm	2 tetesan air miring $15^\circ$
3 diameter $\geq$ 2,5 mm	3 semprotan butir air halus
4 diameter $\geq$ 1,0 mm	4 semprotan butir air lebih besar
5 debu	5 pancaran air
6 kedap debu	6 pancaran air yang kuat
	7 perendaman sementara
	8 perendaman kontinyu

Tindakan pengamanan dalam pekerjaan sangat penting bagi setiap teknisi yang bekerja dengan tegangan kerja diatas 50V. Seorang teknisi menggunakan sarung tangan karet khusus dan helm dengan pelindung mata **gambar-11.8** melakukan perbaikan dalam kondisi bertegangan. Bahkan teknisi tersebut harus memiliki sertifikat kompetensi khusus, karena kesalahan sedikit saja akan berakibat fatal bagi keselamatan jiwanya. Pekerjaan perbaikan instalasi listrik disarankan tegangan listrik harus dimatikan dan diberikan keterangan sedang dilakukan perbaikan.

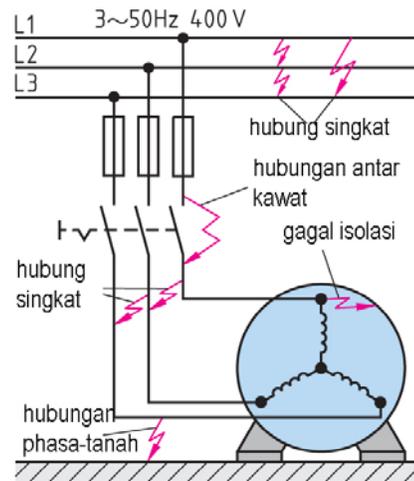


Gambar 11.8 : Pelindung tangan dan mata

### 11.3. Jenis Gangguan Listrik

Gangguan listrik adalah kejadian yang tidak diinginkan dan mengganggu kerja alat listrik. Akibat gangguan, peralatan listrik tidak berfungsi dan sangat merugikan. Bahkan gangguan yang luas dapat mengganggu keseluruhan kerja sistem produksi dan akan merugikan perusahaan sekaligus pelanggan. Jenis gangguan listrik terjadi karena berbagai penyebab, salah satunya kerusakan isolasi kabel **gambar-11.9a**.

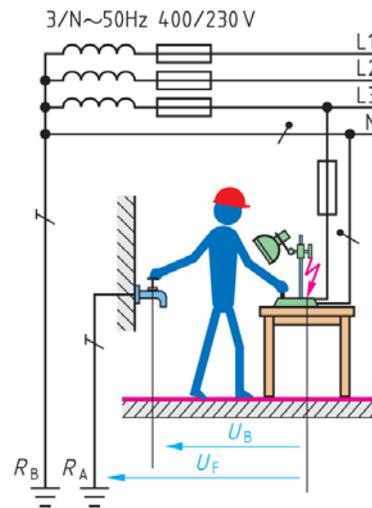
Pertama gangguan hubung singkat antar fasa L1-L2-L3. Kedua gangguan hubung singkat *Pemutus Daya*. Ketiga gangguan hubung singkat antar fasa setelah pemutus daya. Keempat hubung singkat fasa dengan tanah. Kelima kerusakan isolasi belitan stator motor, sebagai akibatnya terjadi tegangan sentuh jika badan alat dipegang orang.



Gambar 11.9a : Gangguan listrik di beberapa titik

Sistem listrik 3 fasa tegangan rendah digambarkan dengan belitan *trafo* sekunder dalam hubungan bintang tegangan 400/230V **gambar-11.9b**. Titik netral sekunder trafo dihubungkan ke tanah dengan tahanan pentanahan  $R_B$ . Jala-jala dengan 3 kawat fasa L1-L2-L3 dan satu kawat netral N untuk melayani beban 3 fasa dan beban 1 fasa.

Sebuah lampu mengalami gangguan, terdapat dua tegangan yang berbeda. Aliran listrik dari L3 menuju lampu dan menuju kawat netral N. Tegangan sentuh  $U_B$  yang dirasakan oleh orang dan tegangan gangguan  $U_F$ . Dalam kasus ini tegangan  $U_B =$  tegangan  $U_F$ , jika besarnya  $> 50V$  membahayakan orangnya. Meskipun kran air yang disentuh orang tsb dihubungkan tanah  $R_A$ , tegangan sentuh yang dirasakan orang bisa membahayakan.



Gambar 11.9b : Gangguan listrik dari beban lampu

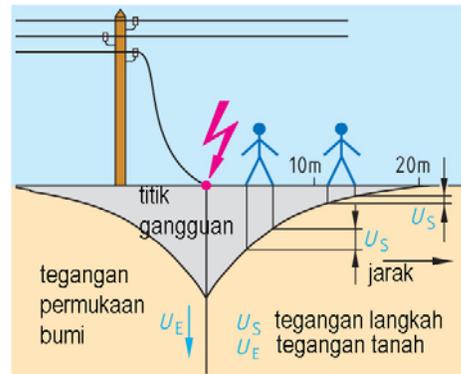
## Sistem Pengamanan Bahaya Listrik

Tabel 11.3. Tegangan Sentuh yang aman

Orang dewasa	AC 50V, DC 120V
Anak-anak	
Hewan peliharaan	AC 25V, DC 60V
Binatang ditaman	

Gangguan listrik bisa terjadi pada tiang saluran distribusi ke pelanggan, dari tiga kawat fase salah satu kawat fase putus dan terhubung ke tanah **gambar-11.10**. Idealnya ketika terjadi kawat fase menyentuh tanah, maka pengamanan listrik berupa fuse atau relay di gardu distribusi terdekat putus sehingga tidak terjadi tegangan gangguan tanah.

Dari titik gangguan ke tanah akan terjadi tegangan gangguan yang terbesar dan semakin mengecil sampai radius 20 meter. Ketika orang mendekati titik gangguan akan merasakan tegangan langkah  $U_S$  makin besar, dan ketika menjauhi titik gangguan tegangan langkah akan mengecil.



Gambar 11.10: Tegangan langkah akibat gangguan ke tanah

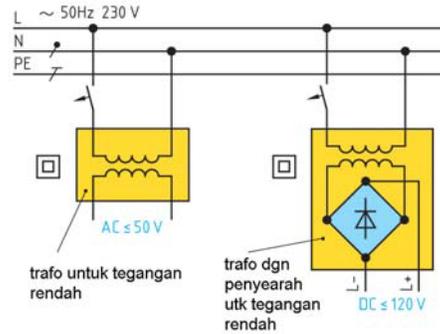
### 11.4. Tindakan Pengamanan untuk Keselamatan



Gambar 11.11: Peta Tindakan Pengamanan

**11.5. Proteksi Tegangan Ekstra Rendah**

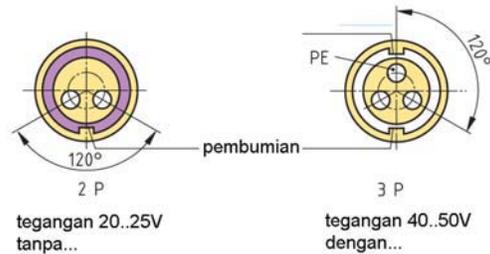
Tegangan ekstra rendah AC 50V dan DC 120V aman jika tersentuh langsung manusia **gambar-11.12**. Untuk menurunkan tegangan dipakai transformator penurun tegangan 230V/50V, dilengkapi dengan selungkup pengaman isolasi ganda. Atau menggunakan transformator 230/120 V yang disearahkan dengan *diode bridge* sehingga diperoleh tegangan DC 120V. Sirkuit SELV (*safety extra low voltage*) tidak boleh dikebunikan, sedangkan untuk PELV (*protective extra low voltage*) bisa dilakukan pembumian.



Gambar 11.12 : Pengamanan dengan tegangan rendah

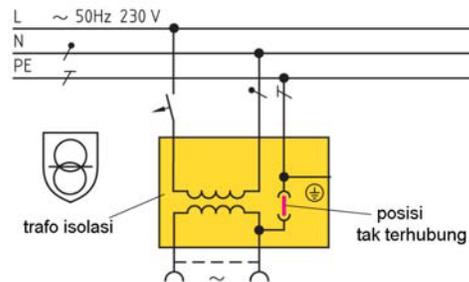
Untuk menjamin sistem SELV dan PELV bekerja baik, dirancang stop kontak dengan desain khusus SELV dan PELV **gambar-11.13**.

Stop kontak SELV memiliki dua lubang kontak yang tidak bisa dipertukarkan. Stop kontak PELV memiliki tiga lubang kontak, satunya berfungsi sebagai sambungan ke penghantar PE (*protective earth*).



Gambar 11.13 : Stop kontak khusus untuk tegangan rendah

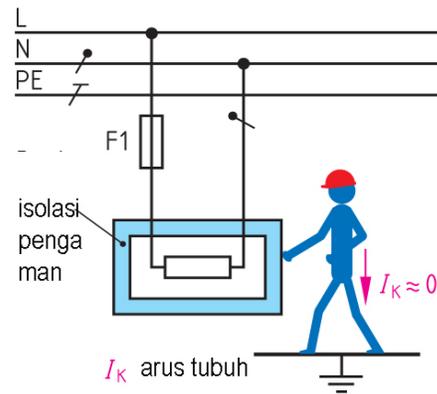
Tindakan pengamanan bisa dilakukan dengan menggunakan transformator pemisah atau motor-generator. Tegangan primer dan sekunder tranformator pemisah besarnya sama, yaitu 230V **gambar-11.14**. Selungkup pengaman dihubungkan ke penghantar PE (*Protective Earth = pengamanan ketanah*). Dengan pemisahan secara elektrik, terjadi proteksi bila terjadi kegagalan isolasi dalam peralatan listrik tersebut.



Gambar 11.14 : Pengamanan dengan trafo pemisah

## 11.6. Proteksi dengan Isolasi Bagian Aktif

Peralatan listrik dirancang dan diberikan perlindungan selungkup dari bahan isolasi **gambar-11.15**. Tujuannya menghindari tegangan sentuh tangan manusia dengan bagian aktif yang bertegangan. Proteksi ini cukup baik selama selungkup bahan isolasi berfungsi semestinya, bagian aktif seluruhnya tertutup oleh isolasi yang hanya dapat dilepas dengan merusaknya. Meskipun ada kegagalan isolasi, dipastikan arus kejut  $I_K$  terhalang oleh bahan isolasi dan arus kejutnya nol. Bahan isolasi harus tahan oleh pengaruh tekanan mekanik, bahan kimia, listrik dan pengaruh *thermal*.



Gambar 11.15 : Pengamanan dengan selungkup isolasi

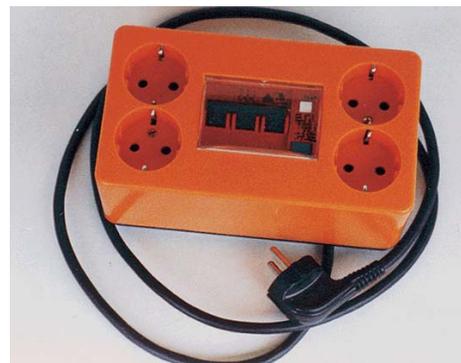
Kabel diberikan perlindungan selubung luar dan bahan isolasi yang memberikan perlindungan elektrik antar kawat **gambar-11.16**. Selubung luar kabel terbuat dari bahan *thermoplastik*, karet, yute. Fungsinya sebagai pelindung mekanis pada waktu pemasangan. Bahan isolasi kabel dari PVC dan karet dirancang mampu menahan tegangan kerja antar penghantar aktif. Jika salah satu kabel terluka maka akan terlindungi dari kemungkinan hubungsingkat antara dua kabel aktifnya.



kabel berisolasi

Gambar 11.16 : Kabel berisolasi thermoplastik

Perlindungan pada stop kontak *portable* juga dirancang dengan kriteria tertentu, misalnya dengan kode IP 2X, IP 4X, IP XXB atau IP XXD **gambar-11.17**. Angka 2 menyatakan proteksi benda asing padat ukuran 12,5 mm, sedang angka 4 menyatakan proteksi benda asing padat ukuran 1,0mm. Angka X menyatakan tidak ada proteksi terhadap tetesan air. Kode huruf B adalah proteksi terhadap jari tangan manusia dan huruf D menyatakan proteksi terhadap masuknya kawat.



Gambar 11.17 : Perlindungan pengaman stop kontak

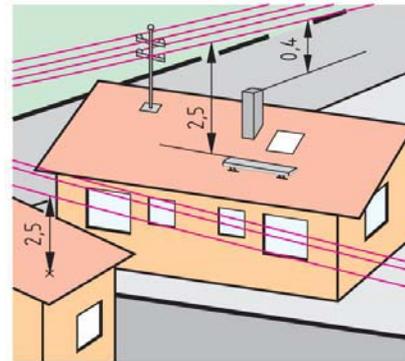
### 11.7. Proteksi dengan Rintangan

Ruang gardu dan panel listrik merupakan ruang yang memiliki tingkat bahaya listrik yang tinggi. Hanya teknisi listrik yang berpengalaman yang boleh berada ditempat tersebut untuk keperluan pelayanan dan perbaikan saja. Diperlukan rintangan berupa pagar besi yang dilengkapi dengan kunci sehingga orang yang tidak berkepentingan bisa bebas keluar masuk ruangan **gambar-11.18**. Maksud dari rintangan adalah untuk mencegah sentuhan tidak disengaja dengan bagian aktif, tetapi tidak mencegah sentuhan disengaja dengan cara menghindari rintangan secara sengaja. Rintangan diberikan tanda-tanda bahaya listrik dengan warna merah menyolok sehingga mudah dikenali dan memberi peringatan secara jelas.



Gambar 11.18 : Pengamanan dengan rintangan

Bentangan kawat saluran udara telanjang di atas atap rumah harus diperhatikan jarak minimal dengan atap rumah sebesar 2,5 meter dan jarak dari cerobong 0,4 meter **gambar-11.19**. Jarak ini cukup aman jika orang berdiri dan jangkauan tangan tidak akan menyentuh kawat listrik secara langsung. Tiang antena dari logam yang berdiri tegak harus dijauhkan dari jalur saluran kawat telanjang, untuk menghindari saat tiupan angin cukup kencang akan saling menyentuh dan membahayakan. Penangkal petir juga cukup jauh dari saluran kawat udara telanjang.

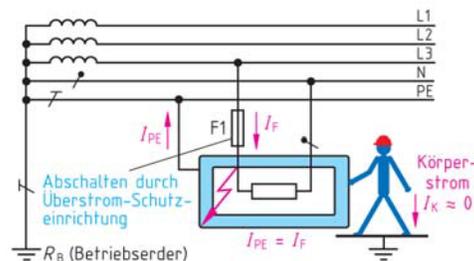


perhatikan jarak aman

Gambar 11.19 : Jarak aman bentangan kabel udara

### 11.8. Proteksi dari Sentuhan Tidak Langsung

Sentuhan tidak langsung adalah sentuhan pada BKT (bagian konduktif terbuka) peralatan atau instalasi listrik yang menjadi bertegangan akibat kegagalan isolasi. Sumber listrik 3 fasa dengan 5 kawat (L1, L2, L3, N dan PE) **gambar-11.20**. BKT saat normal tidak bertegangan dan aman



Gambar 11.20 : Pengamanan sentuhan tidak langsung

disentuh. Ketiga isolasi gagal, aliran listrik gangguan dikembalikan ke kawat PE, sehingga orang terhindar arus kejut meskipun menyentuh bagian BKT.

### 11.9. Jenis Sistem Distribusi

Secara komersial sistem distribusi listrik banyak menggunakan listrik AC tiga fasa dan satu fasa. Distribusi tegangan DC dipakai untuk keperluan khusus seperti saluran listrik atas Kereta Rel Listrik dengan tegangan 1500V di wilayah Jabotabek. Sistem penghantar distribusi dikenal dua yaitu jenis sistem penghantar aktif dan jenis pembumian sistem. Jenis penghantar aktif AC menurut *PUIL 2000: 45* dikenal beberapa jenis, meliputi phase tunggal 2 kawat, phase tunggal 3 kawat, phase dua 3 kawat, phase dua 5 kawat, phase tiga 3 kawat dan phase tiga dengan 4 kawat.

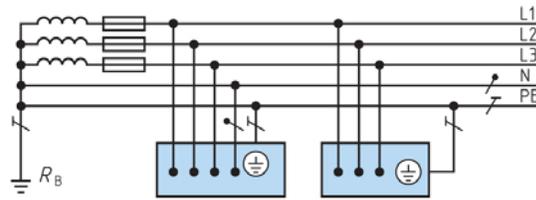
Jenis pembumian sistem untuk sistem tiga fasa secara umum dikenal tiga sistem, yaitu TN, TT dan IT.

Tabel 11.4. Jenis Pembumian Sistem

Contohnya sistem TN-C	
<b>T</b>	<b>Huruf pertama</b> menyatakan hubungan sistem tenaga listrik ke bumi, T = hubungan langsung ke bumi I = satu titik dihubungkan ke bumi melalui suatu impedansi.
<b>N</b>	<b>Huruf kedua</b> menyatakan hubungan BKT instalasi ke bumi. T = hubungan listrik langsung BKT ke bumi, tidak tergantung pembumian setiap titik tenaga listrik, N = hubungan listrik langsung BKT ketitik yang dikebumikan dari sistem tenaga listrik, yang dikebumikan titik netral.
<b>C</b>	<b>Huruf berikutnya</b> , menyatakan susunan penghantar netral (N) dan penghantar proteksi (PE). S = fungsi proteksi yang diberikan oleh penghantar yang terpisah dari netral atau dari saluran yang dikebumikan C = fungsi netral atau fungsi proteksi tergabung dalam penghantar tunggal (PEN).
<b>Keterangan :</b> Notasi T ( <i>terre, prancis</i> ) langsung, I ( <i>isolate</i> ) mengisolasi N ( <i>netral</i> ), S ( <i>separate</i> ) memisahkan, C ( <i>common</i> ) bersamaan	

**11.10. Sistem Pembumian TN**

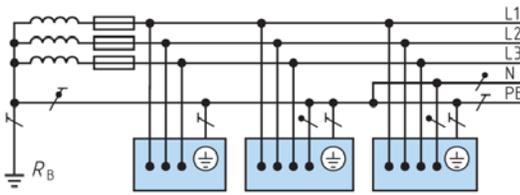
Sistem TN mempunyai satu titik yang dikebunikan langsung pada titik bintang sekunder trafo, dan BKT instalasi dihubungkan ke titik tersebut oleh penghantar proteksi (PEN). Ada tiga jenis sistem TN sesuai dengan susunan penghantar netral (N) dan penghantar proteksi (PE).<sup>1</sup>



Gambar 11.21a : Sistem Pembumian TN-S

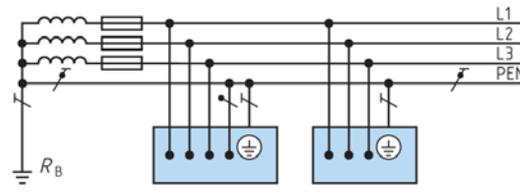
- **Sistem TN-S** fungsi penghantar proteksi PE terpisah diseluruh sistem gambar-11.21a. Titik netral dibumikan di  $R_B$ .

- **Sistem TN-C-S** fungsi penghantar netral (N) dan penghantar proteksi (PE) digabungkan dalam penghantar tunggal, di sebagian sistem gambar-11.21b. Titik netral sistem dibumikan dengan nilai tahanan  $R_B$ .



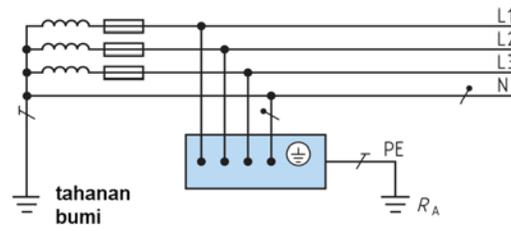
Gambar 11.21b : Sistem Pembumian TN-C-S

- **TN-C** fungsi penghantar netral (N) dan penghantar proteksi (PE) tergabung dalam penghantar tunggal PEN diseluruh sistem gambar-11.21c. Titik netral sistem dibumikan dengan nilai tahanan  $R_B$ .



Gambar 11.21c : Sistem pembumian TN-C

Sistem pembumian TT mempunyai satu titik yang dibumikan langsung ( $R_B$ ). BKT dihubungkan ke *elektrode* bumi secara listrik terpisah  $R_A$  dari *elektrode* bumi sistem gambar-11.22.

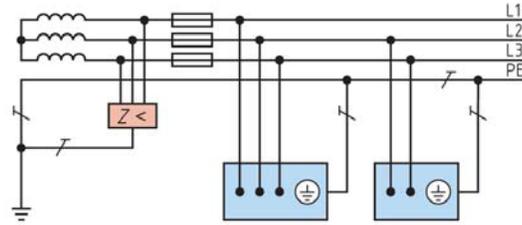


Gambar 11.22 : Sistem Pembumian TT

<sup>1</sup> PUIL 2000, hal 45

## Sistem Pengamanan Bahaya Listrik

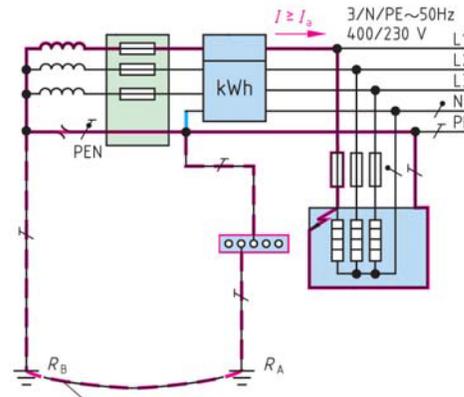
Sistem pembumian IT semua bagian aktif yang diisolasi dari bumi, atau satu titik dihubungkan ke bumi melalui suatu impedansi  $R_B$ . BKT instalasi listrik dibumikan secara independen atau secara kolektif atau pembumian sistem  $R_A$  **gambar-11.23**.



Gambar 11.23 : Sistem Pembumian IT

### 11.11. Pengukuran Pengaman pada Sistem Pembumian TN

Sistem pembumian TN-C-S penghantar netral (N) dan penghantar proteksi (PE) digabungkan dalam penghantar tunggal, disebagian sistem. Beban tiga fase terjadi gangguan isolasi pada belitan fase-1 **gambar-11.24**.



Gambar 11.24 : Sistem pembumian TN-C-S digabung kawat PE

#### Alternatif-1 :

Jalannya arus saat terjadi gangguan adalah : Arus dari trafo -> L1 -> belitan fase-1 -> badan alat-> kawat PE -> netral trafo.

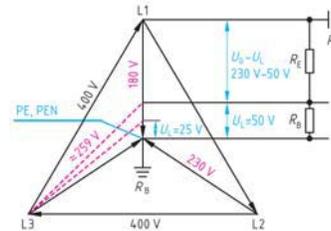
#### Alternatif-2 :

Kawat PEN dekat trafo putus, arus dari trafo -> L1 -> belitan fase-1 -> badan alat -> kawat PE ---> terminal penyama potensial -> pembumian  $R_A$  -> tanah -> pembumian  $R_B$  -> netral trafo.

Perbandingan tahanan  $R_B$  dan  $R_E$  :

$$\frac{R_B}{R_E} \leq \frac{50V}{U_o - 50V}$$

- $R_B$  Tahanan pembumian trafo
- $R_E$  Tahanan pembumian potensial
- 50V Tegangan sentuh aman manusia
- $U_o$  Tegangan fase-netral



Gambar 11.25 : Beda tegangan titik netral akibat gangguan ke tanah

Kondisi normal tegangan fase ke netral  $L1-N = L2-N = L3-N = 230 V$  hubungan bintang dengan titik netral dibumikan di  $R_B$  **gambar-11.25**. Sehingga tegangan fase ke fase  $L1-L2 = L2-L3 = L3-L1 = 400 V$ . Ketika terjadi gangguan fase  $L1-PE$ , drop tegangan di  $R_B = 50 V$ . Sehingga titik netral PEN

bergeser sebesar = 50V, besarnya tegangan fase L1-N menjadi 180 V (230V-50V). Tegangan fase L2-N = L3-N menjadi 259V (metode geometris).

Tabel 11.5. Waktu pemutusan maksimum sistem TN

Tegangan U	Waktu pemutusan detik
≤ AC 230 V	0,4
≤ AC 400 V	0,2
≥ AC 400 V	0,1
Waktu pemutusan konvensional maksimum 5 detik	

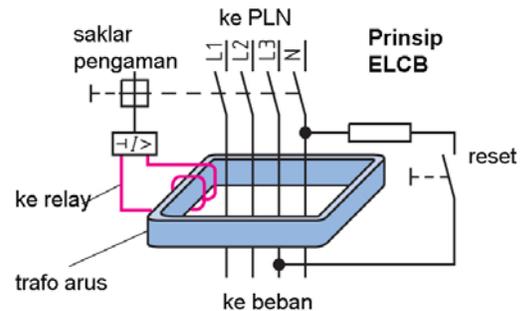
Tabel 11.6. Penampang penghantar sistem TN

TN-C	Penampang penghantar PEN tidak boleh kurang 10mm <sup>2</sup> tembaga atau 16 mm <sup>2</sup> aluminium
TN-S	Penghantar PE terpisah dari penghantar netral < 10 mm <sup>2</sup> tembaga atau <16mm <sup>2</sup> aluminium. tetapi tidak boleh kurang dari penghantar phasenya

### 11.12. Pengaman Gawai Proteksi Arus Sisa (ELCB)

GPAS<sup>3</sup> atau ELCB (*Earth Leakage Circuit Breaker*) adalah pemutus yang peka terhadap arus sisa, yang dapat memutuskan sirkit termasuk penghantar netralnya secara otomatis dalam waktu tertentu **gambar-11.26**. Apabila arus sisa yang timbul karena terjadi kegagalan isolasi melebihi nilai tertentu, sehingga tercegahlah bertahannya tegangan sentuh yang terlalu tinggi. ELCB sangat dianjurkan pada sistem TT.

Untuk sistem TN-S dan TN-C berikut sistem IT tidak boleh dipasang ELCB.



Gambar 11.26 : Prinsip kerja ELCB

Desain fisik ELCB dengan satu fasa, dengan kawat fasa dan netral diputus bersamaan dengan arus bocor 50mA **gambar-11.27**. Dilengkapi dengan tombol reset, jika ditekan tombol reset maka ELCB akan bekerja memutus rangkaian OFF. ELCB harus di ON kan kembali dengan menaikkan tombol ON ke atas. Untuk pemakaian daya besar dipilih arus sisa dengan rating lebih besar dari 30 mA, misalkan 300 mA atau 500 mA.

## Sistem Pengamanan Bahaya Listrik

Pemasangan ELCB pada sistem TT dilakukan dengan cara penghantar protektif PE memiliki rel atau terminal tersendiri, terminal PE dibumikan tersendiri  $R_A$  **gambar-11.28**. Suplay tiga fasa L1-L2-L3 dan N disambungkan langsung ke terminal ELCB.

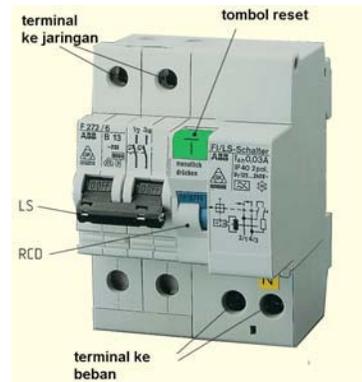
Cara ini bisa melayani beban satu fasa, beban motor tiga fasa dan tersedia melayani stop kontak. Jika salah satu beban terjadi kegagalan isolasi, maka pada kawat netral mengalir arus bocor. Jika besarnya arus bocor memenuhi syarat maka akan mengaktifkan sistem mekanik elektromagnetik, dan ELCB akan OFF secara otomatis.

Tabel 11.7. Kemampuan ELCB pada tegangan 230V

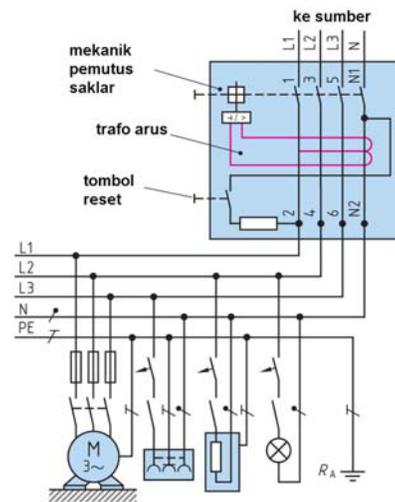
Arus bocor (mA)	Daya (Watt)
30	6,9
300	69
500	115
Rating arus beban 10 <sup>a</sup>	2.300
Rating arus beban 16 <sup>a</sup>	3.680

Kini tersedia ELCB dalam bentuk portabel yang dipasangkan pada stop kontak, dan diujung lainnya terhubung ke stop kontak menuju beban **gambar-11.29**. Persyaratan bisa bekerja dengan baik penghantar PE tersambung dengan baik ke bumi. Bebannya satu fasa berupa peralatan kerja yang mudah dipindah-pindahkan seperti mesin bor tangan, mesin gergaji listrik. Perhatikan daya beban harus sesuai dengan rating ELCB.

Gambar 11.29 : ELCB portabel



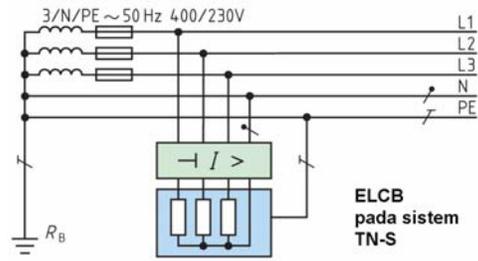
Gambar 11.27 : Fisik ELCB



Gambar 11.28 : Pemasangan ELCB untuk pengamanan kelompok beban



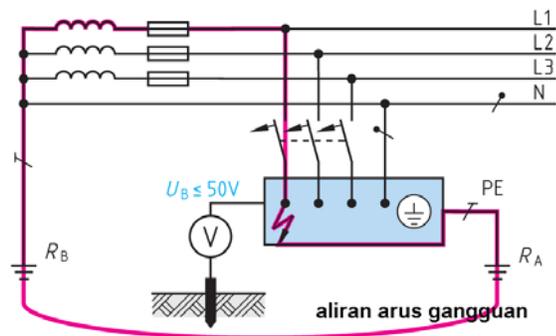
Sistem TN yang dilengkapi dengan ELCB dapat dilakukan dengan penghantar netral (N) dan penghantar protektif (PE) terpisah. Badan alat dihubungkan dengan penghantar PE. Penghantar netral dan protektif disatukan pada titik sumber dihubungkan ke bumi di  $R_B$  **gambar-11.30**. Ketika terjadi kegagalan isolasi, arus bocor akan mengaktifkan ELCB dan tegangan sentuh yang besar tidak akan terjadi.



Gambar 11.30 : ELCB pada pbumian TN

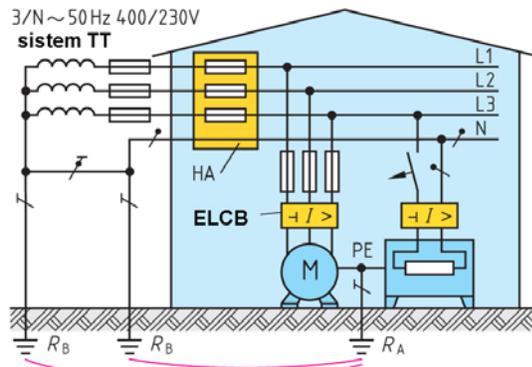
**11.13. Pengukuran Pengaman pada Sistem Pbumian TT**

Sistem TT dalam PUIL 2000 disebut sistem Pbumian Pengaman (sistem PP), dilakukan dengan cara membumikan titik netral di sumbernya  $R_B$ , BKT dibumikan dengan penghantar protektif secara terpisah  $R_A$  **gambar-11.31**. Saat terjadi gangguan fase L1 arus gangguan dari kawat PE mengalir lewat  $R_A$ , kemudian arus mengalir menuju  $R_B$  dan kembali ke netral trafo.



Gambar 11.31 : Pengukuran tahanan pbumian sistem TT

Sistem pbumian TT yang dipasang ELCB pada beban satu fasa dan beban tiga fasa, pbumian dua beban disatukan dengan kawat PE dikebumikan di  $R_A$ . Saat terjadi gangguan arus gangguan mengalir ke kawat PE ke pbumian  $R_A$  lewat tanah menuju ke  $R_B$  dan ke netral trafo **gambar-11.32**.



Gambar 11.32 : ELCB pada sistem TT

Besarnya tahanan pbumian  $R_A$  :

$$R_A = \frac{U_L}{I_{\Delta N}}$$

## Sistem Pengamanan Bahaya Listrik

$R_A$  Tahanan pembumian penghantar PE  
 $I_{\Delta n}$  Arus bocor ELCB

Contoh: Tegangan jala-jala 230 V diketahui tahanan saat hubung singkat  $5\Omega$ , diketahui tahanan pembumian PE sebesar  $2\Omega$ . Hitunglah besarnya arus gangguan dan besarnya tegangan sentuh.

Jawaban :

$$I_K = \frac{U_o}{R_A} = \frac{230V}{5\Omega} = 46 \text{ A}$$

$$U_B = I_K \cdot R_A = 46A \times 2\Omega = 92 \text{ V}$$

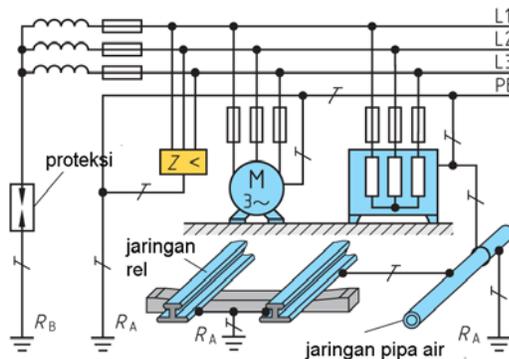
Dengan melihat karakteristik ELCB dipilih rating 16A.

Tabel 11.8. Tahanan Pembumian  $R_A$  pada Sistem TT

Arus sisa ELCB	Tahanan RA dalam $\Omega$	
	UL = 50 V	UL = 25 V
0,01 A	5.000	2500
0,03 A	1.665	832
0,3 A	165	82
0,5 A	100	50

### 11.14. Pengukuran Pengaman pada Sistem Pembumian IT

Sistem pembumian IT, instalasi harus diisolasi dari bumi atau dihubungkan ke bumi melalui suatu impedansi yang cukup tinggi  $R_B$  **gambar-11.33**. Titik netral buatan dapat dihubungkan secara langsung ke bumi jika impedansi urutan nol yang dihasilkan cukup tinggi. Jika tidak ada titik netral maka penghantar fasa dapat dihubungkan ke bumi melalui suatu impedansi. BKT harus dibumikan secara individual, dalam kelompok atau secara kolektif ke pipa besi atau komponen logam yang terhubung langsung ke tanah.



Gambar 11.33 : Pengukuran tahanan pembumian sistem IT

Besarnya impedansi Z sebesar :

$$Z \leq \frac{U}{2.I_a}$$

- Zs Impedansi pembumian
- U Tegangan fasa-netral
- Ia Arus gangguan (sistem TN )

Menghitung besarnya tahanan pembumian langsung R<sub>A</sub> :

$$R_A \cdot I_d \leq U_L$$

- R<sub>A</sub> Tahanan pembumian langsung
- I<sub>d</sub> Arus gangguan sisa
- U<sub>L</sub> Tegangan sentuh (50 V)

Tabel 11.9. Waktu Pemutusan Maksimum Pada Sistem IT

Tegangan nominal instalasi U <sub>o</sub>	Netral tidak terdistribusi (detik)	Netral terdistribusi (detik)
230/400 V	0,4	0,8
400/690 V	0,2	0,4
580/1000 V	0,1	0,2

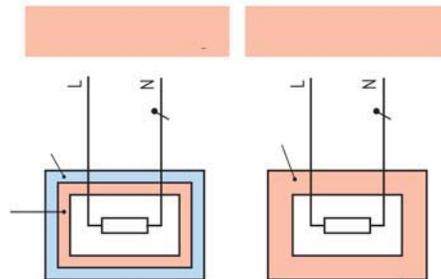
### 11.15. Proteksi dengan Isolasi Ganda

Untuk memberikan pengamanan yang baik beberapa alat listrik dirancang dengan isolasi ganda, simbol isolasi ganda **gambar-11.34**. Alat dengan isolasi ganda tidak memerlukan sistem pentanahan. Jika terjadi kegagalan isolasi, isolasi tambahan akan menahan arus kejut sehingga tetap aman bagi pemakai alat.

Dalam isolasi ganda ada dua jenis isolasi, bagian aktif diisolasi dengan isolasi dasar, bagian luarnya diberikan isolasi kedua yang menjamin tidak akan terjadi tegangan sentuh **gambar-11.35**. Isolasi tambahan ini diperkuat dengan sekrup dari bahan isolasi, tidak boleh mengganti sekrup logam yang memiliki sifat menghantarkan listrik.



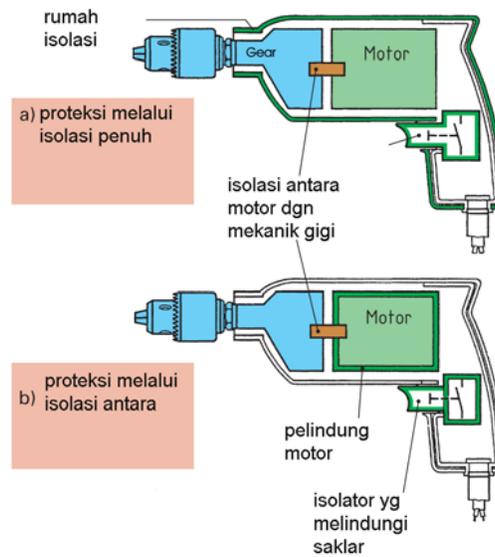
Gambar 11.34 : Simbol pengamanan isolasi ganda



Gambar 11.35 : Isolasi ganda pada peralatan listrik

## Sistem Pengamanan Bahaya Listrik

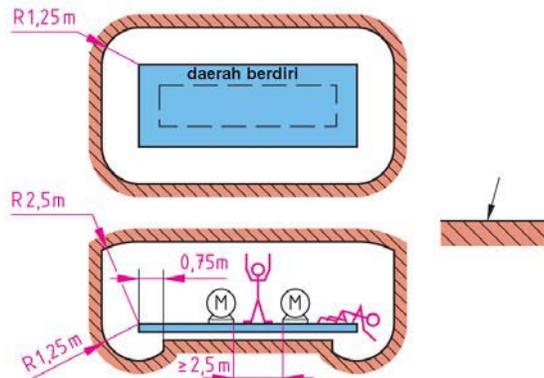
Mesin bor tangan merupakan alat listrik dengan pelindung isolasi ganda **gambar-11.36**. Seluruh bagian aktif berupa motor listrik dan sistem penggerak roda gigi dari logam dibungkus rapat dengan bahan isolasi. Bagian luar ditutup oleh isolasi lapisan kedua untuk menjamin tidak ada bagian konduktif yang bersinggungan dengan tangan, jika terjadi kegagalan isolasi pada motor listriknya. Antara motor dan mekanik bor menggunakan poros bahan isolasi, sehingga meskipun mata bor dipegang dijamin tidak ada arus kejutan mengalir ke tubuh manusia. Bahkan tombol tekan motor juga terbungkus bahan isolasi secara rapat.



Gambar 11.36 : Mesin bor dengan isolasi ganda

### 11.16. Proteksi Lokasi tidak Konduktif

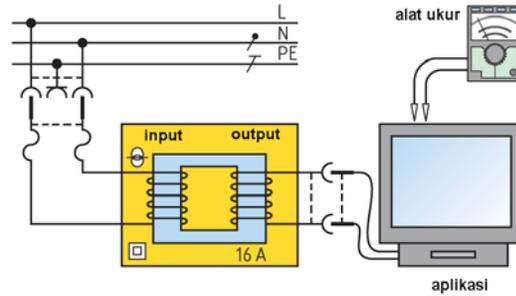
PUIL 2000 :57 mengatur juga bahwa isolasi bisa diberikan pada suatu ruangan yang disebut dengan proteksi lokasi tidak konduktif **gambar-11.37**. Jarak dinding dengan konduktif minimal 1,25 m, dan tinggi lantai terhadap langit-langit minimal 2,5 m sehingga cukup bebas orang berdiri tanpa menyentuh langit-langit tersebut. Dan jarak antara dua peralatan harus lebih besar dari 2,5 m. Resistansi lantai dan dinding pada setiap titik pengukuran besarnya 50 K $\Omega$  jika tegangan nominal isolasi tidak melebihi 500V atau 100 K $\Omega$  jika tegangan nominal isolasi melebihi 500 V.



Gambar 11.37 : Jarak aman pengamanan ruang kerja

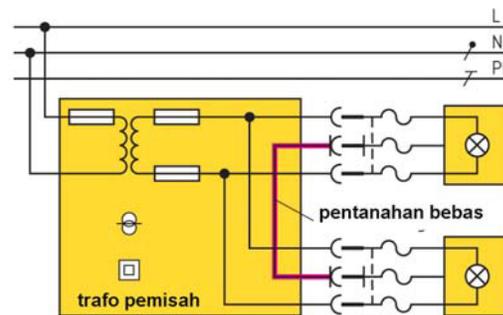
**11.17. Proteksi Pemisahan Sirkuit Listrik**

Tindakan pengamanan dengan cara pemisahan sirkuit listrik antara pemasok dengan sirkuit beban dengan transformator pemisah **gambar-11.38**. Pemisahan sirkuit listrik bisa dengan trafo pemisah atau motor-generator. Bila sirkuit beban terjadi kegagalan isolasi, secara elektrik terpisah dengan sirkuit sumber sehingga tegangan sentuh terhindarkan.

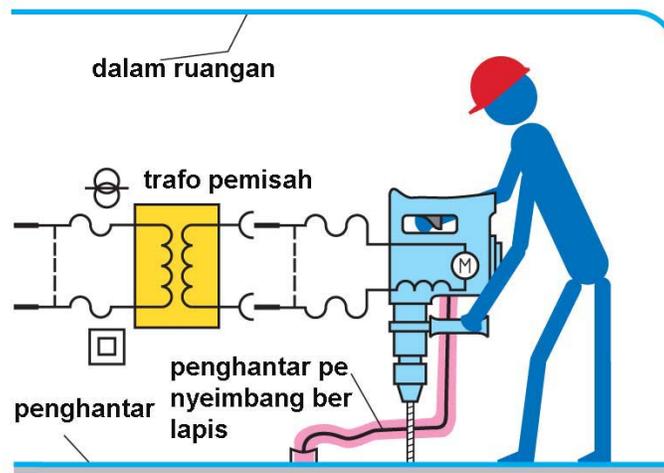


Gambar 11.38 : Pengamanan dengan pemisahan sirkuit listrik

Beberapa alat bisa dipasang dari sekunder trafo pemisah, badan alat sisi sekunder trafo pemisah bisa digabungkan sebagai pengganti penghantar protektif PE **gambar-11.39**. Bagian aktif dari sirkuit yang dipisahkan tidak boleh dihubungkan pada setiap titik ke sirkuit lainnya atau ke bumi. Jika terjadi kegagalan isolasi pada sirkuit sekunder trafo pemisah maka akan terjadi hubungan singkat, sehingga sistem pengamanan pemisah tidak berfungsi.

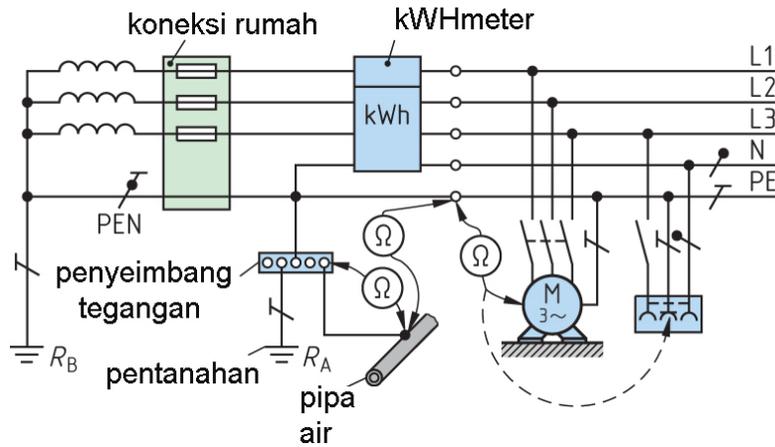


Gambar 11.39 : Trafo pemisah melayani dua stop kontak



Gambar 11.40 : Pengamanan pada peralatan listrik

11.18. Pengukuran Tahanan Penumbumian



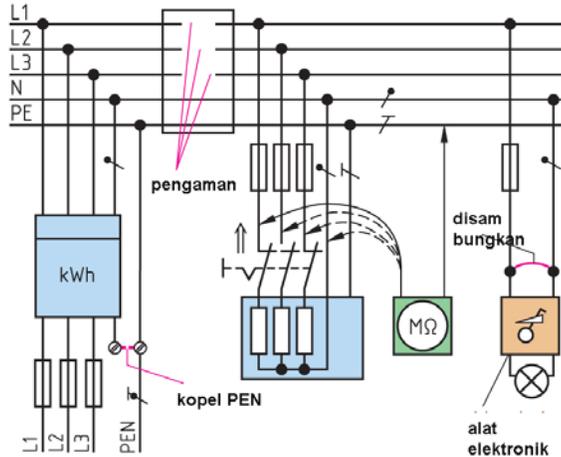
Gambar 11.41 : Pengukuran penbumian dengan megger

Pengukuran tahanan penbumian dapat dilakukan dengan cara sederhana dengan menggunakan alat ukur *Megger* **gambar-11.41**.

Selama pengukuran sumber tegangan harus dimatikan semua, semua saklar menuju ke beban dan penghantar aktif ke stop kontak harus diputuskan. Dengan menggunakan *Megger* maka hasil pengukuran mendekati sesuai tabel dibawah.

Pengukuran	R
Tahanan penbumian sistem	$< 1\Omega$
Tahanan terminal potensial	$< 0,1\Omega$
Tahanan penbumian tegangan tinggi	$< 3\Omega$

Instalasi tegangan rendah adalah instalasi listrik yang diberikan tegangan dibawah 500V **gambar-11.42**. Tahanan isolasi suatu instalasi merupakan salah satu unsur yang menentukan kualitas instalasi tersebut, sebab fungsi utama isolasi sebagai sarana proteksi dasar. Langkah pertama sumber tegangan harus dimatikan dan semua jalur instalasi bebas tegangan. Megger dioperasikan dan mengukur setiap titik-titik yang diperlukan.



Gambar 11.42 : Pengukuran tahanan isolasi

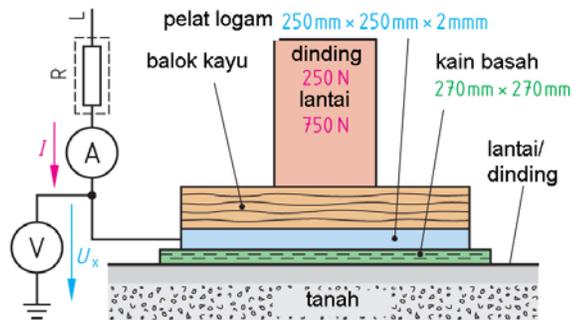
Sebagai contoh rumah tinggal disuplay listrik PLN dilakukan pengukuran isolasi dengan menggunakan Megger, maka hasil yang dicapai harus lebih besar dari yang tertera pada Tabel di bawah.

Tabel 11.10. Nilai resistansi isolasi minimum

Tegangan sirkit nominal	Tegangan uji arus searah (V)	Resistansi isolasi (MΩ)
Tegangan ekstar rendah (SELV, PELV dan FELV) yang memenuhi persyaratan	250	≥ 0,25
Sampai dgn tegangan 500 V, dgn pengecualian hal tsb diatas	500	≥ 0,5
Diatas 500 V	1000	≥ 1,0

### 11.19. Pengukuran Tahanan Isolasi Lantai dan Dinding

PUIL 2000 hal.91 menyatakan untuk melakukan pengukuran tahanan isolasi lantai dapat digunakan metoda pengukuran Ampermeter dan Voltmeter. Sebuah pelat logam bujur sangkar berukuran 250 mm x 250 mm dan kertas atau kain penyerap air basah berukuran 270 mm x 270 mm, ditempatkan antara pelat logam dan permukaan lantai yang akan diuji **gambar-11.43**.



Gambar 11.43 : Pengukuran tahanan isolasi lantai/dinding

Beban sebesar 750 N (sekitar 75 kg, lantai) atau 250 N (25 kg, untuk dinding) dipasang diatas pelat logam tersebut selama pengukuran berlangsung. Agar rata letakkan sebatang kayu diatas permukaan logam.

Besarnya tahanan isolasi lantai adalah :

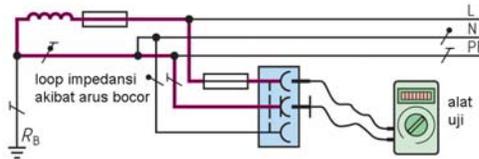
$$Z_x \leq \frac{U_x}{I}$$

- $Z_x$  Impedansi lantai/ dinding
- $U_x$  Tegangan terukur voltmeter
- $I_x$  Arus terukur ampermeter

### 11.20. Pengujian Sistem Pembumian TN

Dalam sistem TN dilakukan dengan cara semua BKT peralatan dan instalasi dibumikan dengan melalui penghantar proteksi PE. Jika terjadi kegagalan isolasi, mengalir arus gangguan yang akan memutuskan secara otomatis alat pengaman *fuse*, MCB, ELCB sehingga tegangan sentuh yang berbahaya tidak terjadi.

Jika terjadi gangguan hubung pendek pada suatu lokasi dalam instalasi, antara penghantar phase dengan penghantar proteksi PE **gambar-11.44**, maka dengan segera terjadi pemutusan rangkaian dengan waktu pemutusan yang cepat sesuai tabel di bawah.



Gambar 11.44 : Pengujian sistem pembumian TN

Tabel 11.11. Waktu pemutusan maksimum sistem TN

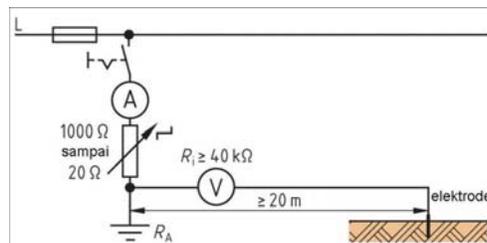
Jika terjadi gangguan hubung pendek antara penghantar phase dengan penghantar proteksi PE	Tegangan U <sub>o</sub> (Volt)	Waktu pemutusan
	≤ 230 V	0,4 detik
	≤ 400 V	0,2 detik
	> 400 V	0,1 detik

Waktu pemutusan konvensional yang tidak dilampaui 5 detik diijinkan untuk sirkit distribusi

\*) PUIL 2000 hal 66

### 11.21. Pengukuran Tahanan Pembumian

Tahanan pembumian yang akan diukur dihubungkan dengan tegangan phase L, melalui pengaman arus lebih, ampermeter, tahanan geser bernilai antara 20 Ω sampai 1000 Ω. Sebuah Voltmeter yang memiliki tahanan dalam R<sub>i</sub> ≥ 40 KΩ, dan sebuah *elektrode* bantu yang ditanam dengan jarak lebih dari 20 m dari *elektrode* pembumian R<sub>A</sub>. **gambar-11.45**.



Gambar 11.45 : Pengukuran tahanan pembumian

Posisikan tahanan geser pada resistansi maksimum (1000 Ω), geser perlahan-lahan sampai terbaca tegangan V dan penunjukan arus A. Besarnya tahanan pembumian R<sub>A</sub> sebesar :

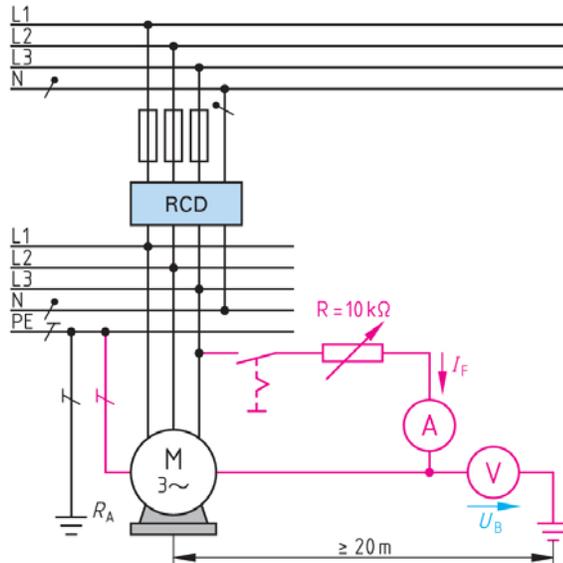
$$R_A = \frac{U_E}{I_E} \quad R_A \leq \frac{U_L}{I_a} \quad R_A \leq \frac{U_L}{I_{\Delta n}}$$

$R_A$	Tahanan pembumian
$U_E$	Tegangan phasa-netral
$I_E$	Arus
$I_a, I_{\Delta n}$	Arus gangguan
$U_L$	Tegangan sentuh

### 11.22. Pengukuran Arus Sisa dan Tegangan pada ELCB

Motor induksi 3 phasa dilengkapi dengan proteksi ELCB akan diukur dengan menggunakan Amperemeter dan Voltmeter untuk menguji besarnya arus sisa yang mengakibatkan ELCB bekerja **gambar-11.46**.

Tegangan phasa dari L3 melalui tahanan geser bernilai 10k $\Omega$  dan Amperemeter, sebuah Voltmeter memiliki Tahanan dalam minimal 3 K $\Omega$  dan sebuah *elektrode* bantu yang dibumikan dengan jarak lebih besar 20 m dari lokasi motor.



Gambar 11.46 : Pengukuran tahanan bumi ELCB

Tahanan geser pada posisi maksimum, saklar di-ON-kan, lakukan pengaturan sampai terbaca Amperemeter dan Voltmeter menunjukkan skala 50V. Pada saat itu ELCB harus OFF, artinya arus sisa yang melewati tahanan geser mengerjakan alat ELCB dengan baik.

### 11.23. Rangkuman

- Penelitian arus listrik 50 mA adalah batas aman bagi manusia.
- Tahanan tubuh manusia rata-rata 1.000  $\Omega$ , arus aman tubuh manusia 50mA, maka besarnya tegangan sentuh aman 50 Volt.
- Kode IP (*International Protection*) peralatan listrik menunjukkan tingkat proteksi yang diberikan oleh selungkup dari sentuhan langsung ke bagian yang berbahaya, dari masuknya benda asing padat dan masuknya air.

- Pekerjaan perbaikan instalasi listrik disarankan tegangan listrik harus dimatikan dan diberikan keterangan sedang dilakukan perbaikan.
- Gangguan listrik adalah kejadian yang tidak diinginkan dan mengganggu kerja alat listrik.
- Jenis gangguan listrik terjadi karena kerusakan isolasi kabel.
  1. Pertama gangguan hubung singkat antar fasa L1-L2-L3.
  2. Kedua gangguan hubung- singkat *Pemutus Daya*.
  3. Ketiga gangguan hubung singkat antar fasa setelah pemutus daya.
  4. Keempat hubung singkat fasa dengan tanah.
  5. Kelima kerusakan isolasi belitan stator motor, sebagai akibatnya terjadi tegangan sentuh jika badan alat dipegang orang.
- Jenis pembumian sistem untuk sistem tiga fasa secara umum dikenal tiga sistem, yaitu TN, TT dan IT.
- **Sistem TN-S** fungsi penghantar proteksi PE terpisah diseluruh sistem **gambar-11.21a**. Titik netral dibumikan di  $R_B$ .
- **Sistem TN-C-S** fungsi penghantar netral (N) dan penghantar proteksi (PE) digabungkan dalam penghantar tunggal,
- **TN-C** fungsi penghantar netral (N) dan penghantar proteksi (PE) tergabung dalam penghantar tunggal PEN
- Sistem pembumian TT mempunyai satu titik yang dibumikan langsung ( $R_B$ ).
- Sistem pembumian TN-C-S penghantar netral (N) dan penghantar proteksi (PE) digabungkan dalam penghantar tunggal,
- ELCB (*Earth Leakage Circuit Breaker*) adalah pemutus yang peka terhadap arus sisa, yang dapat memutuskan sirkit termasuk penghantar netralnya secara otomatis
- Sistem pembumian IT, instalasi harus diisolasi dari bumi atau dihubungkan ke bumi melalui suatu impedansi yang cukup tinggi  $R_B$
- Dalam isolasi ganda ada dua jenis isolasi, bagian aktif diisolasi dengan isolasi dasar, bagian luarnya diberikan isolasi kedua yang menjamin tidak akan terjadi tegangan sentuh.
- Tindakan pengamanan dengan cara pemisahan sirkit listrik antara pemasok dengan sirkit beban dengan transformator pemisah
- Pengukuran tahanan pembumian dapat dilakukan dengan cara sederhana dengan menggunakan alat ukur *Megger*
- Pengukuran tahanan isolasi lantai dapat digunakan metoda pengukuran Ampermeter dan Voltmeter.

### 11.24. Soal-soal

1. Jelaskan pentingnya sistem pengamanan dalam instalasi listrik.
2. Dikenal bahaya tegangan sentuh langsung dan tidak langsung, jelaskan kedua istilah tersebut dan berikan contohnya.
3. Ketika tersengat listrik ada orang yang terkaget-kaget, ada yang pingsan dan bahkan ada korban jiwa. Jelaskan mengapa terjadi hal demikian.
4. Mengapa tegangan 50V dianggap aman bagi tubuh manusia, jelaskan.
5. Bodi motor listrik sebaiknya diketanahkan, jelaskan mengapa hal tersebut dilakukan.
6. Trafo pemisah dapat menjadi alat pengamanan, jelaskan mengapa hal tersebut bisa terjadi.
7. Gambarkan skematik pengukuran tahanan pembumian instalasi rumah tinggal. Jelaskan prosedur dan urutannya dengan benar.

## **BAB 12**

### **TEKNIK PENGATURAN OTOMATIS**

**Daftar Isi :**

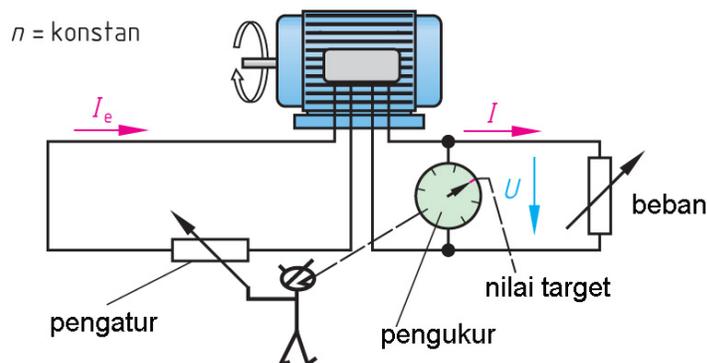
12.1.	Pengertian sistem Pengaturan .....	12-2
12.2.	Diagram Blok Sistem Kontrol .....	12-5
12.3.	Perilaku Sistem Kontrol .....	12-10
12.4.	Tipe Kontroler .....	12-17
12.5.	Kontroler Dua Posisi .....	12-17
12.6.	Kontroler Tiga Posisi .....	12-18
12.7.	Kontroler Proporsional (P) .....	12-20
12.8.	Kontroler Integral (I) .....	12-22
12.9.	Kontroler Proporsional Integral (PI) .....	12-23
12.10.	Kontroler Derivatif (D) .....	12-23
12.11.	Kontroler Proporsional Derivatif (PD) .....	12-24
12.12.	Kontroler PID .....	12-25
12.13.	Karakteristik Osilasi pada Sistem Kontrol .....	12-26
12.14.	Seleksi tipe Kontroler untuk Aplikasi Tertentu .....	12-27
12.15.	Optimisasi Kontroler .....	12-27
12.16.	Elektropneumatik .....	12-28
12.17.	Komponen Elektro Pneumatik .....	12-29
12.18.	Rangkaian Dasar .....	12-35
12.19.	Rangkuman .....	12-36
12.20.	Soal-soal .....	12-37

### 12.1. Pengertian Sistem Pengaturan

Pengertian kontrol atau pengaturan adalah proses atau upaya untuk mencapai tujuan. Sebagai contoh sederhana dan akrab dengan aktivitas sehari-hari dari konsep kontrol atau pengaturan adalah saat mengendarai kendaraan. Tujuan yang diinginkan dari proses tersebut adalah berjalannya kendaraan pada lintasan (*track*) yang diinginkan. Ada beberapa komponen yang terlibat di dalamnya, misalnya pedal gas, *speedometer*, mesin (penggerak), rem, dan pengendara.

Sistem kontrol berkendara berarti kombinasi dari komponen-komponen tersebut yang menghasilkan berjalannya kendaraan pada lintasan yang diinginkan. Ketika jalan lengang dan aturan memperbolehkan, pengendara mempercepat laju kendaraan dengan membuka pedal gas. Demikian pula, jika ada kendaraan lain di depan atau lampu penyeberangan berwarna merah maka pengendara menginjak rem dan menurunkan kecepatannya. Semua upaya itu dilakukan untuk mempertahankan kendaraan pada lintasan yang diinginkan.

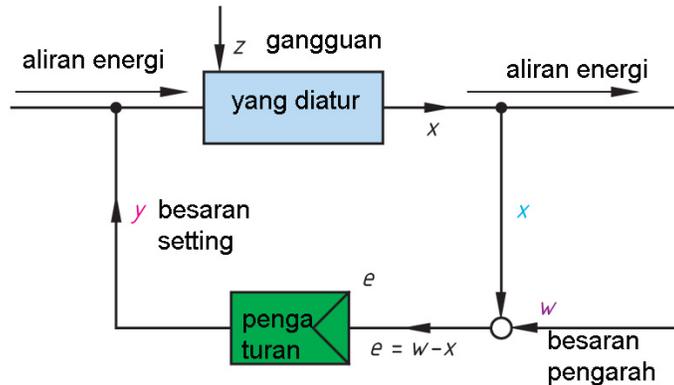
Misalnya kita ingin mengatur agar tegangan yang dihasilkan oleh Generator arus searah bernilai konstan, seperti pada ***gambar 12.1***.



Gambar 12.1 Pengaturan manual tegangan pada Generator

Dalam sistem tersebut, karena tegangan keluaran  $U$  diinginkan tetap maka arus keluaran  $I$  berubah sesuai dengan nilai beban. Arus keluaran dihasilkan oleh kecepatan putar rotor pada Generator yang dibangkitkan oleh arus eksitasi  $I_e$ . Dengan berubah-ubahnya arus  $I$  maka arus eksitasi  $I_e$  juga harus berubah mengikuti nilai arus  $I$  tersebut. Perubahan arus eksitasi dilakukan secara manual. Besar arus eksitasi disesuaikan dengan kebutuhan untuk menghasilkan arus keluaran  $I$  oleh Generator. Karena pengaturan ini dilakukan secara manual, seorang operator harus terus-menerus melihat besar arus keluaran yang diinginkan untuk disesuaikan dengan besar arus eksitasi yang

diperlukan. Dalam istilah teknik kontrol, tegangan  $U$  disebut variabel yang dikontrol  $x$ , arus eksitasi disebut variabel buatan (*manipulated variable*)  $y$ , dan arus beban  $I$  disebut variabel gangguan (*disturbance variable*)  $z$ . Tegangan konstan yang diinginkan dalam pengaturan ini disebut variabel acuan (referensi). Dalam bentuk diagram blok, sistem kontrol digambarkan pada **gambar 12.2**. Dalam diagram blok tersebut, *plant* menghasilkan variabel yang dikontrol serta kontroler menghasilkan variabel termanipulasi.



Gambar 12.2 Diagram blok sistem kontrol

Contoh lain dapat disebutkan berupa proses memindahkan barang oleh tangan kita. Pada proses tersebut, tujuannya adalah posisi atau letak barang yang diinginkan. Komponennya berupa tangan (dalam hal ini tentunya dengan otot tangan), mata, dan otak sebagai pengontrol. Pada saat tangan bergerak untuk memindahkan barang, mata akan menangkap informasi tentang posisi pada saat itu. Informasi tersebut diproses oleh otak untuk disimpulkan apakah posisinya sudah benar atau tidak. Selanjutnya, apabila posisinya masih belum tercapai maka otak akan memerintahkan otot tangan untuk bergerak memindahkan barang ke posisi yang diinginkan. Proses pengaturan suhu tubuh adalah juga contoh dari sistem kontrol. Tujuannya adalah menjaga suhu tubuh agar berjalan normal. Secara umum dapat dikatakan semua proses yang terjadi di alam pada hakikatnya adalah sebuah sistem kontrol.

Dalam teknik kontrol dipelajari tentang pengaturan sistem agar menghasilkan keluaran yang diinginkan. Komponen utama sistem kontrol terdiri atas objek yang dikontrol (disebut *plant*), variabel (besaran) yang dikontrol, dan aktuator. Tabel 12.1 memperlihatkan contoh sistem kontrol dengan komponen-komponennya. Misalnya *plant* berupa motor listrik, maka variabel yang dikontrol adalah kecepatan dan aktuatornya adalah kontaktor.

Tabel 12.1. Contoh komponen sistem kontrol

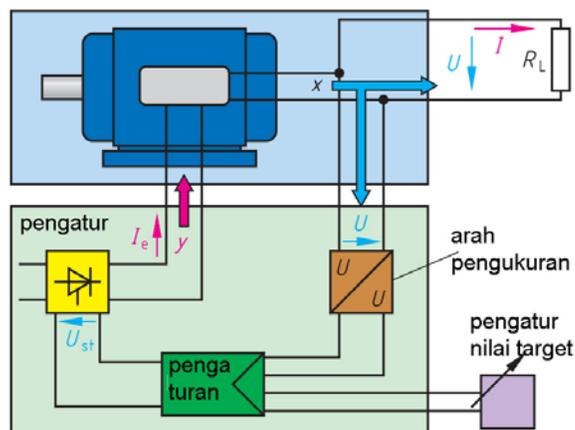
Plant	Variabel yang dikontrol	Aktuator
Motor listrik	Kecepatan putar	Kontaktor
Generator	Tegangan	Transistor
Pengatur suhu ruangan	suhu	<i>Thyristor</i>

Tabel 12.2 memperlihatkan istilah teknis dalam sistem kontrol serta simbol formalnya.

Tabel 12.2. Istilah penting dalam sistem kontrol

Istilah	Simbol	Contoh
Variabel yang dikontrol	$x$	Tegangan
Variabel acuan	$w$	Tegangan acuan
Variabel termanipulasi	$y$	Arus eksitasi
Selisih ( <i>error</i> )	$e$	Selisih tegangan
Variabel gangguan	$z$	Arus beban

Selain secara manual, pengaturan tegangan pada Generator bisa dilakukan secara otomatis dengan menggunakan *Thyristor*, seperti diperlihatkan pada **gambar 12.3**.



Gambar 12.3 Pengaturan tegangan secara otomatis

Dalam pengaturan secara otomatis, peranan operator diganti oleh peralatan atau komponen yang secara otomatis bekerja sesuai dengan fungsi operator. Pada **gambar 12.3**, peranan operator diganti oleh gabungan antara sensor tegangan (berupa trafo tegangan) dan *Thyristor* sebagai aktuator penghasil arus eksitasi yang mengatur kecepatan putar rotor dalam Generator.

Dalam sistem tersebut, setiap harga tegangan yang dihasilkan oleh Generator ditangkap oleh trafo tegangan untuk dibandingkan dengan tegangan acuan (referensi). Selisih tegangan ini menjadi input pemicu (*trigger*) *Thyristor* yang menentukan nilai arus eksitasi dan output tegangan yang selanjutnya mempengaruhi Generator untuk menghasilkan tegangan output yang diinginkan.

Prinsip pengaturannya adalah sebagai berikut : apabila tegangan output lebih rendah dari tegangan acuan maka *Thyristor* akan menghasilkan arus eksitasi sehingga tegangan output Generator naik mendekati harga tegangan acuannya, sebaliknya jika tegangan output lebih tinggi dari tegangan acuan maka *Thyristor* akan menghasilkan arus eksitasi sehingga tegangan output Generator turun mendekati harga tegangan acuannya.

## 12.2. Diagram Blok Sistem Kontrol

Ada dua bentuk umum sistem kontrol yaitu :

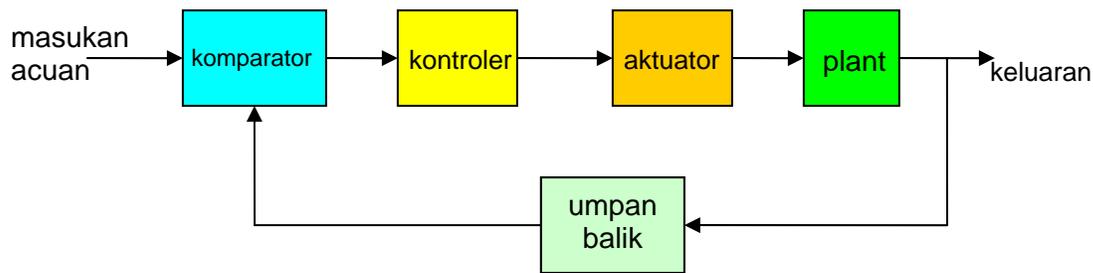
- Sistem Kontrol Lingkar-terbuka (*Open-Loop Control System*).
- Sistem Kontrol Lingkar-tertutup (*Closed-Loop Control System*) atau sistem kontrol dengan umpan balik (*Feedback Control System*).

Sistem kontrol yang pertama sering disebut pengaturan secara manual, sedangkan yang kedua disebut kontrol otomatis. Seperti diperlihatkan pada **gambar 12.2**, untuk memudahkan melihat proses pengaturan yang berlangsung dalam sistem kontrol, dibuat diagram blok yang menggambarkan aliran informasi dan komponen yang terlibat dalam sistem kontrol tersebut. Gambar kotak mewakili tiap komponen dalam sistem kontrol, sedangkan aliran informasi diperlihatkan dengan garis dengan tanda anak panah di salah satu ujungnya yang menandakan arah informasi atau data dalam proses pengaturan tersebut. Diagram blok sistem kontrol lingkar terbuka (SKL-buka) diperlihatkan dalam **gambar 12.4**.



Gambar 12.4 Diagram blok sistem kontrol open-loop

Sedangkan diagram blok sistem kontrol lingkaran tertutup diperlihatkan dalam **gambar 12.5**.



Gambar 12.5 Diagram blok sistem kontrol closed-loop

Dalam sistem kontrol lingkaran tertutup, nilai keluaran berpengaruh langsung terhadap aksi pengaturan. Sinyal selisih (*error*) yaitu perbedaan antara masukan acuan dan sinyal umpan balik diberikan kepada kontroler sedemikian sehingga dalam prosesnya memperkecil selisih dan menghasilkan keluaran sistem pada harga atau kondisi yang diinginkan. Sistem kontrol lingkaran tertutup dalam kenyataannya selalu merujuk kepada sistem yang menggunakan umpan balik untuk mengurangi *error* sistem.

Sistem kontrol lingkaran-terbuka adalah sistem yang keluarannya tidak berpengaruh terhadap aksi pengaturan. Dengan kata lain, dalam sistem ini keluarannya tidak diukur ataupun diumpanbalikkan untuk dibandingkan dengan masukan. Contoh praktis sistem ini adalah mesin cuci. Perendaman, pencucian, dan penyabunan dalam mesin cuci beroperasi berdasarkan waktu yang ditentukan oleh pengguna. Mesin tidak mengukur kondisi sinyal keluaran berupa kebersihan pakaian. Dalam sistem tersebut, keluaran tidak dibandingkan dengan masukan acuan, sehingga masukan acuan berhubungan dengan kondisi operasi (*operating condition*) yang tetap. Akibatnya ketelitian sistem sangat bergantung kepada kalibrasi. Dalam hal adanya gangguan, sistem kontrol lingkaran-terbuka tidak akan menunjukkan hasil yang diharapkan. Sistem kontrol ini dapat digunakan dalam praktek hanya jika hubungan antara masukan dan keluaran diketahui dan tidak ada gangguan.

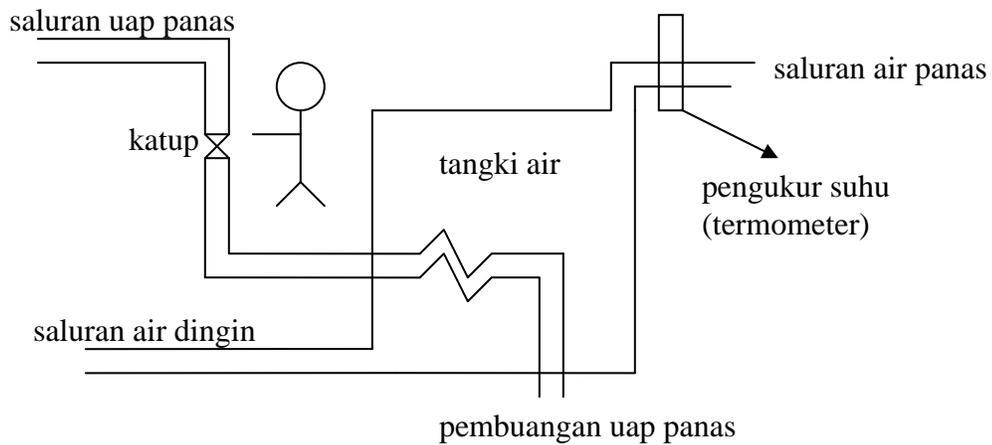
Keuntungan dari sistem kontrol lingkaran-tertutup terlihat dari penggunaan umpan balik yang membuat respon sistem tidak terlalu peka (*sensitif*) terhadap gangguan luar ataupun perubahan nilai-nilai komponen dalam sistem. Hal tersebut memungkinkan penggunaan komponen yang tidak akurat dan murah untuk mewujudkan pengendalian yang akurat untuk suatu *plant*. Dari sisi kestabilan, sistem kontrol lingkaran-terbuka relatif lebih mudah dibuat karena kestabilan sistem bukan masalah utama. Di lain pihak, kestabilan menjadi masalah besar dalam sistem kontrol lingkaran-tertutup karena penanganan *error* yang berlebihan bisa menyebabkan osilasi. Sistem kontrol ini bermanfaat

apabila ada gangguan yang bersifat sukar ditentukan atau diramalkan, tetapi biasanya sistem kontrol lingkaran tertutup juga memerlukan daya dan biaya yang relatif lebih besar dibandingkan dengan sistem kontrol lingkaran-terbuka yang bersesuaian.

Dewasa ini dengan kemajuan teknologi dalam bidang elektronika dan komputer, hampir seluruh sistem dikendalikan secara elektronik dan terkomputerisasi. Peran manusia menjadi hanya sebagai operator. Dalam merealisasikan sistem yang dikendalikan dengan komputer maka penambahan komponen pengubah dari sinyal analog ke digital dan sebaliknya mutlak diperlukan untuk menjamin keberlangsungan proses dalam sistem tersebut

**Contoh 1: Pemanasan air**

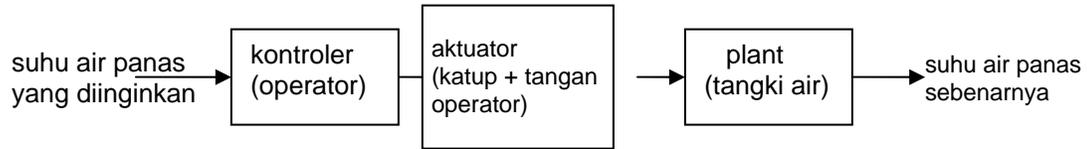
Perhatikan diagram skematik sistem pemanasan air pada **gambar 12.6**.



Gambar 12.6 Sistem Pemanasan Air

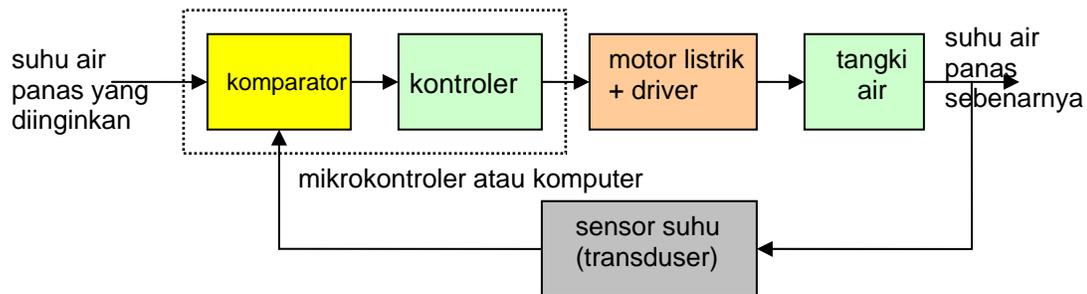
Skema tersebut memperlihatkan sistem pengaturan yang bertujuan untuk memperoleh air panas dengan suhu tertentu. Air yang akan dipanaskan disimpan dalam tangki air (*PLANT*). Mekanisme pemanasan air dilakukan dengan mengalirkan uap panas ke dalam saluran uap panas yang selanjutnya uap panas ini akan memanaskan air dingin yang masuk ke dalam tangki. Seorang operator (*KONTROLER*) bertugas untuk mengatur aksi buka tutup katup (*AKTUATOR*) pada saluran uap panas.

Algoritma kontrolnya adalah apabila suhu air panas kurang dari yang diinginkan maka buka katup saluran uap, sebaliknya jika suhu air panas lebih dari yang diinginkan maka tutup katup saluran uap. Sebuah termometer (*SENSOR*) digunakan untuk mendeteksi besar suhu air panas yang dihasilkan. Sistem kontrol tersebut dapat **gambar 12.7** melalui diagram blok berikut



Gambar 12.7 Diagram blok sistem pemanasan air

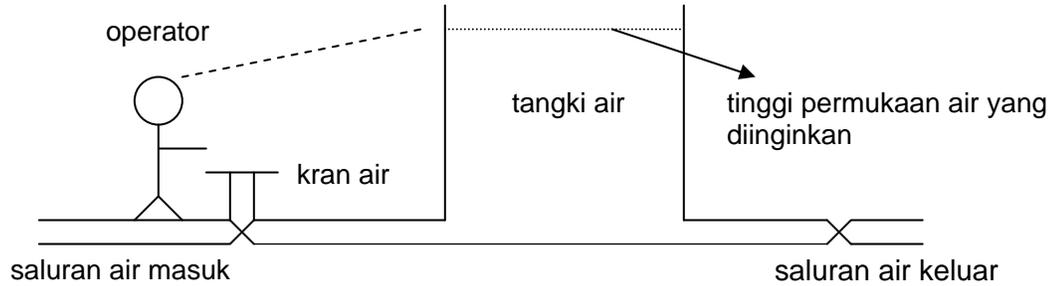
Meskipun ada sensor berupa termometer pada sistem ini, kita tidak dapat mengatakan sistem ini sebagai SKL-tutup, karena data suhu tidak diproses langsung oleh sistem tetapi diproses melalui operator. Dengan kata lain, intervensi operator menyebabkan berlangsungnya proses dalam sistem. Apabila diinginkan menjadi sistem kontrol lingkaran tertutup, maka fungsi operator harus diambil alih oleh peralatan elektronika pemroses keputusan (misalnya komputer atau mikrokontroler) serta rangkaian penggerak (*driver*) pemutar buka tutup katup. Selain itu sensor elektronis juga menjadi kebutuhan untuk menjamin tersedianya informasi keluaran yang terus-menerus. Bentuk diagram blok sistem kontrol lingkaran tertutup untuk sistem pemanasan air ini diperlihatkan pada **gambar 12.8**



Gambar 12.8 Diagram blok sistem pemanasan air secara otomatis

### Contoh 2. Pengaturan tinggi permukaan air

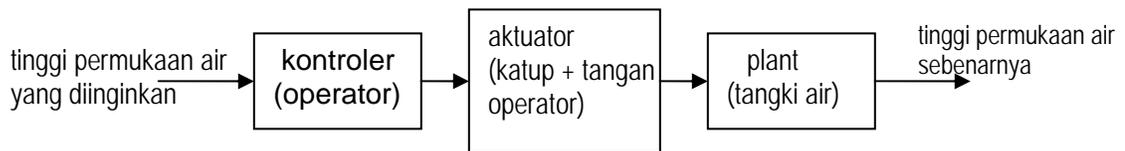
**Gambar 12.9** secara skematik memperlihatkan pengaturan tinggi permukaan air. Dalam sistem ini, yang ingin diatur adalah tinggi permukaan air dalam tangki (PLANT). Seorang operator (KONTROLER) bertugas membuka tutup kran air (AKTUATOR) untuk menjaga tinggi permukaan air yang tetap. Algoritma kontrolnya adalah buka kran air apabila tinggi permukaan air turun dan tutup kran air apabila tinggi permukaan air lebih dari yang diinginkan.



Gambar 12.9 Pengaturan tinggi permukaan air

Disini yang berfungsi sebagai sensor adalah mata sang operator yang selalu melihat tinggi permukaan air.

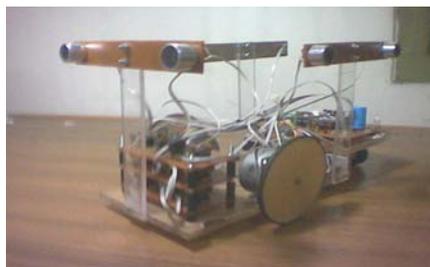
Diagram blok sistem kontrol lingkaran terbuka untuk sistem ini dapat digambarkan dalam bentuk berikut



Gambar 12.10 diagram blok pengaturan tinggi air

### Contoh 3. Mobile Robot

Mobile robot secara sederhana didefinisikan sebagai robot yang bergerak sendiri mengikuti jalur (*path*) yang diinginkan untuk menghindari rintangan. Prototipenya diperlihatkan dalam **gambar 12.11**.



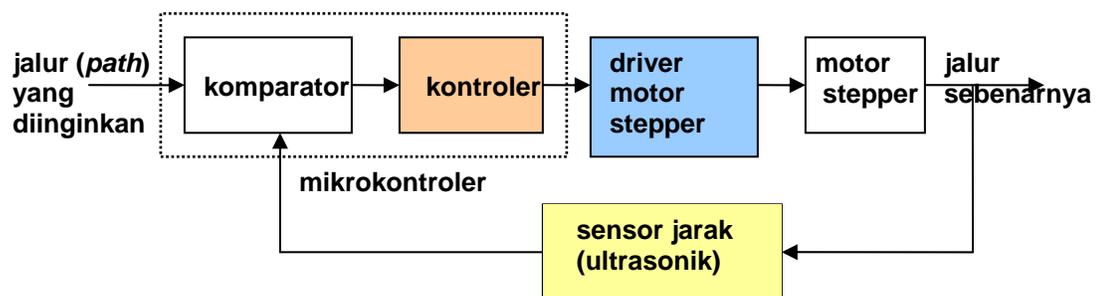
Gambar 12.11 Prototipe mobile robot

Prototipe *mobile robot* tersebut dilengkapi dengan sensor ultrasonik untuk mendeteksi jarak dirinya ke penghalang di depan, samping kiri, dan kanannya.

## Teknik Pengaturan Otomatis

Selain itu, mikrokontroler digunakan sebagai pengaturnya, dan motor *stepper* difungsikan untuk menggerakkan rodanya. Cara kerjanya adalah sebagai berikut. Robot berjalan dalam arah lurus ke depan, jika sensor depan mendeteksi adanya penghalang, maka sensor samping (kiri dan kanan) akan mendeteksi ada atau tidak penghalang. Jika di kiri tidak ada penghalang, maka robot berbelok ke kiri, sebaliknya jika penghalangnya di kanan, maka dia berbelok ke kanan. Sedangkan jika penghalang juga berada di kiri dan kanan, maka robot bergerak mundur.

Diagram blok sederhana untuk menggambarkan sistem tersebut diperlihatkan pada ***gambar 12.12***.

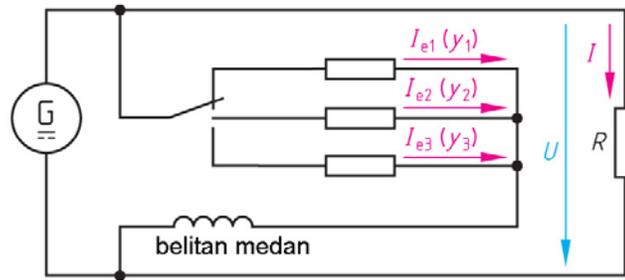


*Gambar 12.12 kontrol otomatis pada mobile robot*

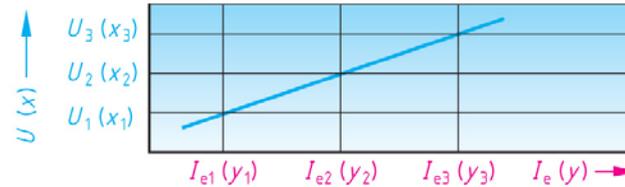
### 12.3. Perilaku Sistem Kontrol

Ada dua tipe perilaku sistem kontrol, yaitu statis dan dinamis. Perilaku statis sistem kontrol diperlihatkan oleh hubungan linier antara variabel yang dikontrol dengan perubahan variabel termanipulasinya, sedangkan perilaku dinamis ditandai oleh respon sistem kontrol terhadap inputnya.

Sebagai contoh, ***gambar 12.13*** memperlihatkan sistem kontrol pada Generator arus searah dengan variabel yang dikontrol berupa tegangan dan variabel termanipulasinya arus eksitasi pada lilitan medannya. ***Gambar 12.13a*** adalah diagram rangkaiannya sedangkan ***gambar 12.13b*** memperlihatkan karakteristik statis dari sistem kontrol pada Generator tersebut.



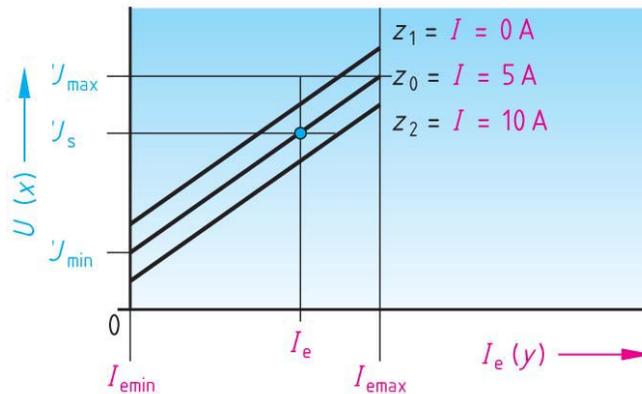
a) Rangkaian Generator DC



b) Grafik statis

Gambar 12.13 Perilaku statis Generator Arus Searah

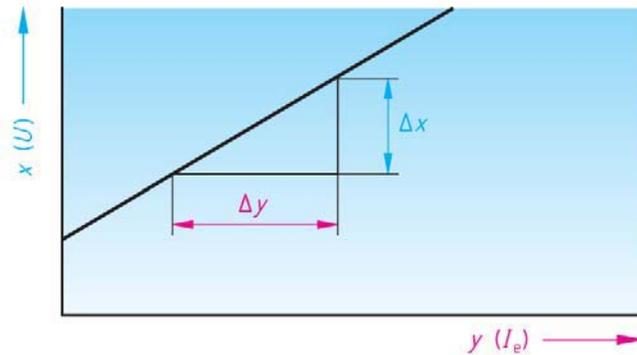
Untuk setiap nilai arus yang dihasilkan oleh Generator, hubungan antara arus eksitasi dan tegangan keluaran digambarkan dengan garis lurus (persamaan linier) seperti diperlihatkan pada **gambar 11.14**.



Gambar 12.14 Hubungan tegangan fungsi arus

Perilaku statis dari sistem kontrol dinyatakan dengan koefisien transfer ( $K_s$ ), yaitu angka yang menunjukkan perbandingan antara perubahan nilai variabel yang dikontrol ( $x$ ) dengan perubahan nilai variabel termanipulasi ( $y$ ).

Secara grafis, hubungan tersebut diperlihatkan pada **gambar 12.15**.



Gambar 12.15 Perubahan Tegangan fungsi Arus Eksitasi

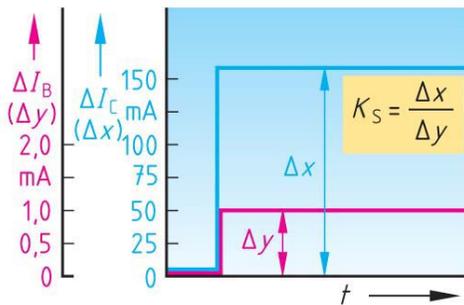
Dari grafik tersebut, koefisien transfer dinyatakan dengan rumus :

$$K_s = \frac{\Delta x}{\Delta y}$$

**Contoh :** Sebuah pemanas listrik memerlukan arus dari 5 A sampai 7 A untuk menghasilkan suhu dari 80° C sampai 100°C. Hitung koefisien transfer dari sistem tersebut.

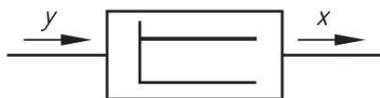
**Jawab :**

$$K_s = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{100^{\circ}C - 80^{\circ}C}{7A - 5A} = 10 \frac{K}{A}$$



a) Respon step & koefisien transfer

Sedangkan perilaku sistem dinamis ditinjau dari respon sistem yang dikontrol terhadap input berbentuk tangga (*step*). Input berasal dari variabel termanipulasi, sedangkan respon sistemnya berupa variabel yang dikontrol. **Gambar 11-16** memperlihatkan respon sistem dan simbolnya.



b) Simbol

Gambar 12.16 Sistem  $PT_0$

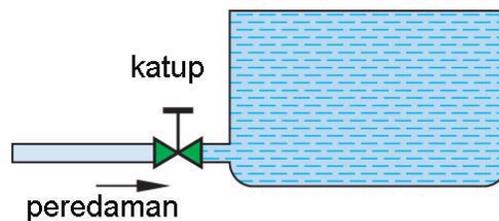
Berdasarkan bentuk responnya, ada lima klasifikasi sistem kontrol, yaitu

1. Sistem kontrol tanpa waktu tunda ( $PT_0$ ),
2. Sistem kontrol waktu tunda satu langkah ( $PT_1$ ),
3. Sistem kontrol waktu tunda dua langkah ( $PT_2$ ),
4. Sistem kontrol waktu tunda banyak ( $PT_n$ ), dan
5. Sistem kontrol dengan waktu mati (*dead time*).

$P$  pada penamaan sistem tersebut berarti *proporsional*, artinya bentuk sinyal reponnya sebanding dengan bentuk sinyal inputnya. Sedangkan  $T$  berindeks berarti waktu tunda respon terhadap inputnya. Waktu tunda adalah waktu yang dibutuhkan oleh respon sistem untuk mencapai bentuk inputnya.  $T_0$  ( $T=0$ ) artinya tidak ada waktu tunda pada respon sistem, sehingga untuk sistem  $PT_0$  begitu input diberikan pada sistem atau sistem dijalankan, respon sistem langsung mengikuti bentuk inputnya.  $T_1$  berarti waktu tunda responnya tingkat satu,  $T_2$  berarti waktu tunda responnya tingkat dua, dan seterusnya. Secara umum, semakin besar tingkat waktu tundanya semakin lambat respon output terhadap inputnya.

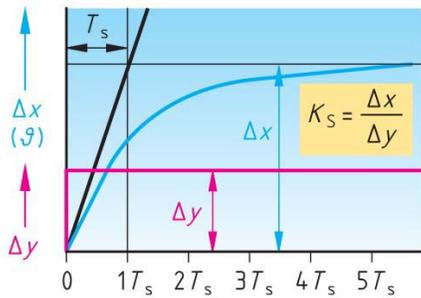
Bentuk respon sistem  $PT_0$  diperlihatkan pada **gambar 12.16a**. Pada gambar tersebut terlihat sistem merespon inputnya secara langsung tanpa ada selang waktu. Simbol sistem  $PT_0$  diperlihatkan pada **gambar 12.16b**. Terlihat bahwa pada sistem  $PT_0$ , nilai output langsung mengikuti nilai inputnya tanpa penundaan waktu.

Sebagai contoh dari sistem ini adalah pengaturan arus kolektor suatu transistor bipolar dengan input arus basisnya. Sementara sistem  $PT_1$  diperlihatkan pada **gambar 12.17**. Model fisik dari sistem  $PT_1$  menggambarkan sebuah proses pemanasan air dengan mengalirkan uap panas pada sebuah tangki melalui operasi buka tutup katup. Tujuan pengaturannya adalah air diinginkan memiliki suhu tertentu.

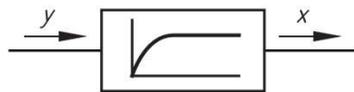


Gambar 12.17 Model fisik  $PT_1$

Pada saat katup dibuka untuk mengalirkan uap panas ke dalam tangki, proses pemanasan mulai berlangsung. Suhu air bertambah seiring dengan banyaknya uap panas yang mengalir ke dalam tangki.



a) Respon step & koefisien transfer



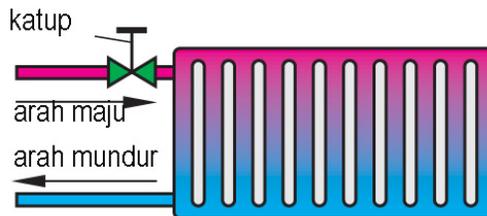
b) Simbol

Perubahan suhu air dalam tangki mengikuti grafik pada **gambar 12.18a**. Pada grafik tersebut,  $x$  menyatakan suhu air setiap saat, sedangkan  $y$  menandai suhu air yang diinginkan. Perubahan suhu air berlangsung lambat dan mengikuti bentuk eksponensial dengan konstanta waktu  $T_s$ . Simbol sistem  $PT_1$  diperlihatkan pada **gambar 12.18b**.

Terlihat bahwa nilai outputnya mencapai atau mengikuti nilai inputnya dalam waktu tertentu (waktu tunda). Contoh lain dari sistem  $PT_1$  adalah kumparan, karena jika tegangan diberikan pada kumparan, arus yang muncul mengikuti bentuk eksponensial seperti pada **gambar 12.18a**.

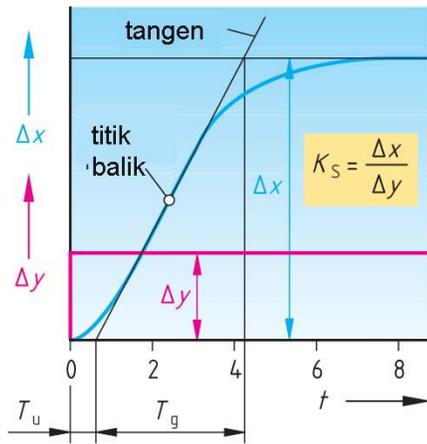
Gambar 12.18 Respon Kontrol  $PT_1$

Radiator pemanas ruang dengan uap pemanas merupakan contoh sistem  $PT_2$  diperlihatkan pada **gambar 12.19**.



Gambar 12.19 Model Sistem Kontrol  $PT_2$

Model radiator dengan saluran masuk uap panas melalui katup dan dilengkapi saluran keluar udara dari radiator tersebut. Prinsip pengaturannya sama dengan pemanasan air, yaitu diharapkan radiator tersebut memiliki suhu akhir tertentu. Pada saat katup uap panas dibuka maka proses pemanasan mulai berlangsung. Adanya saluran keluar yang tidak dilengkapi katup menyebabkan suhu dalam radiator tidak mengalami perubahan, seolah-olah uap panas yang masuk langsung dibuang melalui saluran keluar. Kondisi ini berlangsung dalam rentang waktu tertentu yang disebut waktu mati (*deadtime*)  $T_d$ .



a) Respon step & koefisien transfer



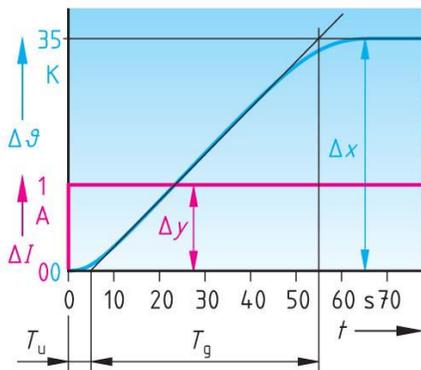
b) Simbol

Gambar 12.20 Respon sistem  $PT_2$

Apabila proses pemasukan uap panas terus berlangsung, maka perubahan suhu dalam radiator mengikuti pola grafik pada **gambar 12.20**. Suhu akhir diperoleh dalam selang waktu tertentu yang disebut waktu menetap (*settling time*)  $T_g$ . Adanya dua parameter waktu tunda  $T_u$  dan  $T_g$  menyebabkan sistem ini disebut sistem  $PT_2$ .

Simbol sistemnya diperlihatkan pada **gambar 12.20b**. Dapat dilihat pada simbol itu, bahwa output sistem mulai merespon setelah beberapa saat (waktu mati) dan mencapai inputnya setelah selang waktu tertentu (waktu menetap).

Contoh lain dari sistem  $PT_2$  ini adalah motor arus searah dengan magnet permanen, dimana kecepatannya diatur melalui perubahan arus jangkar. Sistem ini memiliki dua konstanta waktu, satu untuk lilitan jangkar dan yang lainnya untuk mempercepat bagian jangkar.

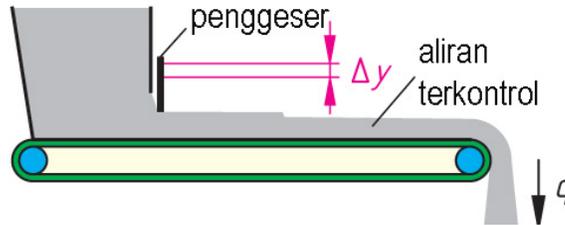


Gambar 12.21 Respon kontrol  $PT_n$

Sementara itu, sistem  $PT_n$  adalah sistem dengan respon yang sangat lambat dibandingkan dengan dua sistem terdahulu. Kalau sistem  $PT_1$  waktu tundanya mungkin berkisar dalam satuan milidetik dan sistem  $PT_2$  waktu tundanya dalam kisaran puluhan milidetik, maka waktu tunda untuk sistem  $PT_n$  mungkin berkisar dalam satuan detik sampai puluhan detik. Secara grafik, bentuk respon untuk sistem  $PT_n$  sama dengan sistem  $PT_2$  yaitu memiliki dua konstanta waktu seperti diperlihatkan pada **gambar 12.21**. Perbedaannya terletak pada kisaran waktu tunda dalam satuan puluhan detik.

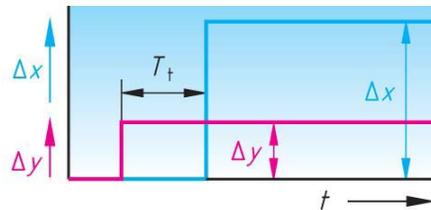
Misalnya dalam suatu sistem kontrol ada enam komponen yang terlibat dalam proses pengaturan dan masing-masing menyumbang waktu tunda terhadap sistem maka sistemnya disebut sistem  $PT_6$ .

Kelompok lainnya adalah sistem kontrol dengan waktu mati (*deadtime*). Seperti diuraikan sebelumnya, waktu mati didefinisikan sebagai saat ketika sistem tidak merespon inputnya. Jadi output sistem baru muncul setelah waktu mati. **Gambar 12.22** memperlihatkan proses pemindahan barang atau bahan di sebuah proses produksi dari satu tempat ke tempat lain melalui ban berjalan. Karena ada waktu yang dibutuhkan oleh barang atau bahan untuk berpindah dari posisi semula ke posisi akhir, maka ada rentang waktu kosong (*deadtime*) sebelum output sistem – dalam hal ini awal proses di bagian berikutnya – terjadi.

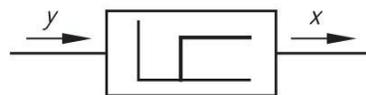


Gambar 12.22 Model Dead Time

Secara grafik, respon sistem kontrol yang memiliki waktu mati diperlihatkan pada **gambar 12.23a**. Terlihat bahwa output baru muncul ( $x$ ) setelah waktu mati ( $T_t$ ) dari waktu awal inputnya ( $y$ ). Sedangkan simbol sistem kontrol dengan waktu mati diperlihatkan pada **gambar 12.23b**.



a) Respon Step



b) Simbol

Gambar 12.23 Respon Kontrol Deadtime

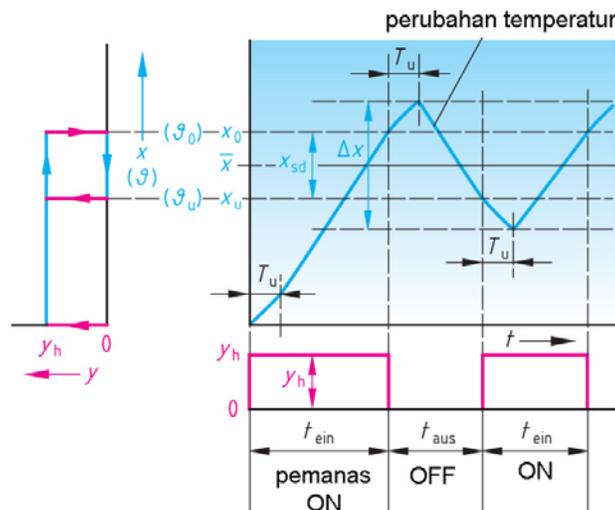
## 12.4. Tipe Kontroler

Kontroler dapat diibaratkan sebagai otak dari sistem kontrol. Komponen tersebut berfungsi sebagai pusat pengatur proses dalam sistem kontrol. Secara teknis, ada dua input ke kontroler, yaitu output sebenarnya yang dihasilkan plant (disebut variabel yang dikontrol  $x$ ) dan masukan acuan (referensi  $w$ ). Input yang diproses oleh kontroler adalah selisih dari dua input tersebut (*error*  $e$ ). Sedangkan output kontroler berupa variabel termanipulasi ( $y$ ).

Berdasarkan cara kerjanya ada dua tipe kontroler, yaitu kontroler kontinu dan kontroler diskrit. Kontroler diskrit terdiri atas kontroler dua posisi (*On-Off*) dan kontroler tiga posisi. Sedangkan kontroler kontinu terdiri atas lima jenis, yaitu kontroler Proporsional ( $P$ ), Kontroler integral ( $I$ ), kontroler Proporsional dan Integral ( $PI$ ), kontroler Derivatif ( $D$ ), kontroler Proporsional Derivatif ( $PD$ ), dan kontroler Proporsional-Integral-Derivatif ( $PID$ ).

## 12.5. Kontroler Dua Posisi

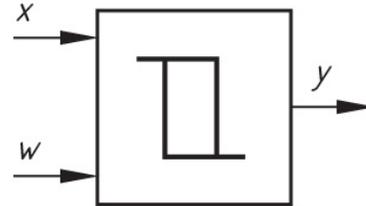
Kontroler tipe ini memiliki prinsip kerja nyala-padam (*On-Off*) secara bergantian dengan waktu yang ditentukan, sehingga dinamai juga kontroler *On-Off*. Salah satu penerapan kontroler ini misalnya pada pengaturan suhu ruangan agar berada di antara dua nilai suhu rendah dan tinggi (suhu nyaman). Apabila ruangan bersuhu rendah maka kontroler bekerja untuk menaikkan suhu ruangan, sebaliknya apabila suhu ruangan mencapai posisi suhu tinggi maka kontroler bekerja untuk menurunkan suhu ruangan dengan cara memutus arus pemanasnya. Karakteristik kontroler ini diperlihatkan pada **gambar 12.24**. Kondisi suhu mengikuti grafik pada gambar tersebut.



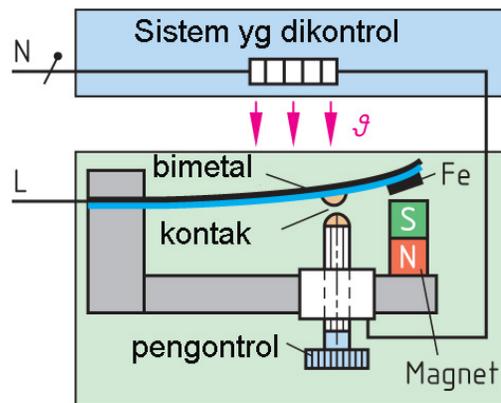
Gambar 12.24 Kontroler dua posisi (*On-Off*)

Pada saat awal proses pemanasan ruangan, suhu naik sedikit demi sedikit sampai mencapai suhu tingginya. Karena ketidakidealan sistem, timbul waktu tunda  $T_u$ . Waktu tunda tersebut muncul baik pada saat kondisi on ke off ataupun sebaliknya dari kondisi off ke on seperti terlihat pada gambar tersebut sebagai akibat komponen atau pengatur tidak bisa langsung merespon perubahan inputnya.

Pada kontroler ini bentuk kurva karakteristik input-outputnya disebut *hysteresis* seperti terlihat di bagian kiri **gambar 12.24**. Dengan melihat kurva ini, perpindahan (transisi) dari posisi on ke off berlangsung ketika suhu mencapai suhu tinggi ( $x_o$ ) dan sebaliknya perpindahan posisi off ke on terjadi pada saat suhu mencapai suhu rendah ( $x_u$ ). Simbol kontrol dua posisi (*On-Off*) diperlihatkan pada **gambar 12.25**.



Gambar 12.25 Simbol kontrol on-off

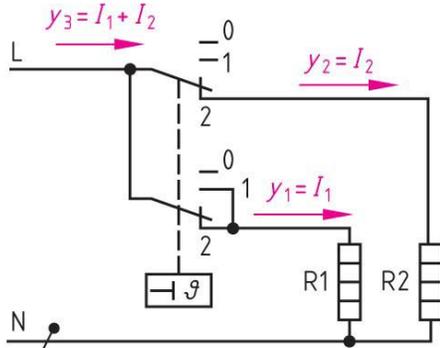


Gambar 12.26 Kontroler suhu bimetal

Kontroler suhu bimetal adalah sebuah kontroler dua posisi yang diperlihatkan pada **gambar 12.26**. Posisi *On-Off*nya ditentukan oleh kontak bimetal. Apabila suhu panas maka keping bimetal akan melengkung sedemikian sehingga kontak terlepas sehingga elemen pemanasnya terputus kontakannya sehingga suhu akan turun. Adanya magnet menyebabkan suatu saat keping bimetal kembali akan tertarik dan menyebabkan kontak kembali bekerja dan proses pemanasan berlangsung kembali. Karena suhu naik, keping bimetal kembali melengkung dan memutus kontak dengan pemanas, sehingga proses awal berulang, dan seterusnya.

**12.6. Kontroler Tiga Posisi**

Kontroler tiga posisi **gambar 12.27** memiliki karakteristik satu posisi *On* dan dua posisi *Off*, atau sebaliknya dua *On* dan satu *Off*. Dalam bentuk rangkaian listrik digambarkan pada gambar 12.27. Pemanas listrik R1, terhubung pada induk saklar 1 dan 2. Sedangkan pemanas R2 hanya terhubung pada saklar cabang 2 saja.



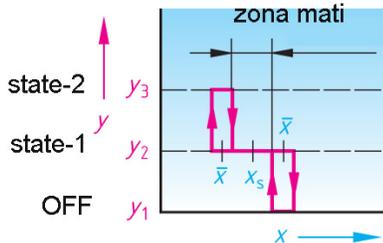
Gambar 12.27 Kontrol tiga posisi

Ketika posisi saklar pada 0, kedua pemanas posisi *Off* dan kedua pemanas tidak mendapat catu daya listrik, hasilnya suhu dingin. Ketika sensor suhu mencapai angka setting tertentu saklar cabang akan menghubungkan cabang 1 dengan pemanas R1, satu pemanas bekerja.

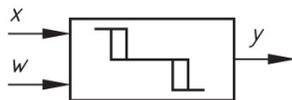
Jika pemanas akan dinaikkan temperaturnya, sensor temperatur menggerakkan saklar ke cabang 2, pada posisi ini pemanas R1 dan R2 secara bersamaan bekerja dan dihasilkan temperatur lebih tinggi.

Sedangkan karakteristik dan simbol dari kontroler tiga posisi terlihat pada **gambar 12.28**.

Contoh pemakaian kontroler tiga posisi adalah pada sistem pengaturan suhu yang memerlukan tiga keadaan, yaitu panas-tinggi, panas-sedang, dan keadaan mati (*Off*), seperti diperlihatkan pada **gambar 12.29**

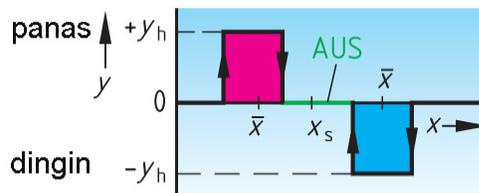


a) Grafik



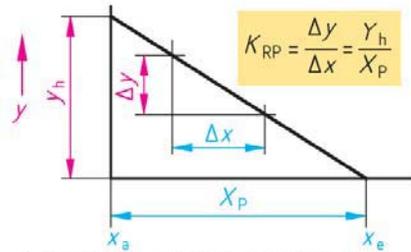
b) Diagram blok

Gambar 12.28 Karakteristik dan simbol kontroler tiga posisi

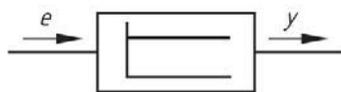


Gambar 12.29 Karakteristik kontroler tiga posisi dengan posisi tengah nol

12.7. Kontroler Proporsional (P)



a) Grafik dan respon Proporsional



b) Diagram blok

$K_{RP}$  kontroler P

$\Delta y$  perubahan besaran aktuator

$\Delta x$  perubahan besaran kontrol

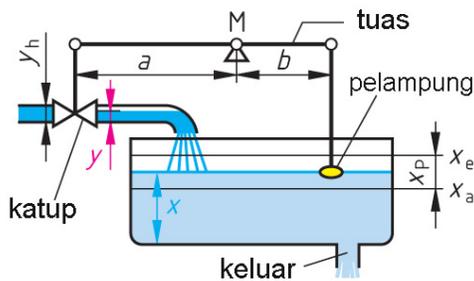
$Y_h$  range pengesetan

$X_p$  range Proporsional

Kontroler Proporsional memiliki karakteristik bahwa outputnya berupa variabel yang dikontrol berubah sebanding (Proporsional) dengan inputnya yang berupa variabel selisih (*error*) antara masukan acuan (*reference*) dengan variabel termanipulasi atau output nyata dari plant. Karakteristik dan diagram blok kontroler ini diperlihatkan pada **gambar 12.30**.

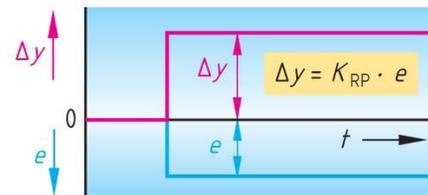
Aplikasi kontroler proporsional misalnya pada pengaturan tinggi permukaan air seperti pada **gambar 12.31**. Buka tutup katup akan sebanding dengan posisi pelampung yang mengukur selisih antara tinggi permukaan air yang diinginkan (*referensi*) dengan tinggi air sesungguhnya (*x*).

Gambar 12.30 Kontrol proporsional



Gambar 12.31 Aplikasi kontroler proporsional

Respon sistem kontrol dengan kontroler proporsional diperlihatkan pada **gambar 12.32**. Hubungan antara variabel yang dikontrol *y* dengan *error* *e* dinyatakan dengan bentuk persamaan linier dengan konstanta kesebandingan (proporsional)  $K_{RP}$ .



$\Delta y$  perubahan besaran aktuator

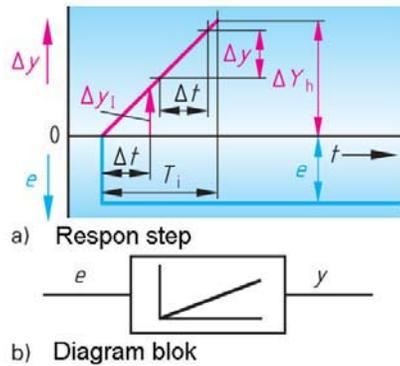
$K_{RP}$  kontrol Proporsional

*e* beda kontrol

Gambar 12.32 Respon kontrol proporsional

## 12.8. Kontroler Integral (I)

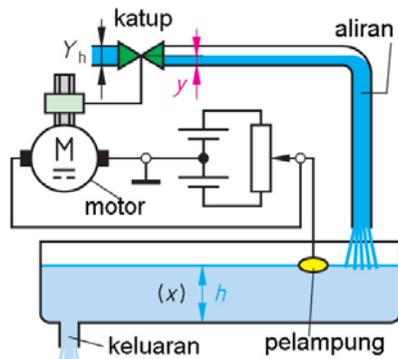
Laju perubahan (kecepatan) nilai output dari kontroler integral sebanding dengan nilai inputnya. Input sistem berupa variabel selisih (*error*) antara masukan acuan (referensi) dengan variabel termanipulasi atau output nyata dari *plant*.



Gambar 12.33 Kontroler Integral

dikontrol (*plant*) untuk mencapai output yang diinginkan, sehingga selisih (*error*) nya semakin kecil.

Aplikasi kontroler integral ini misalnya pada pengaturan level permukaan air yang melibatkan motor sebagai komponen aktuatornya, seperti diperlihatkan pada **gambar 12.34**.



Gambar 12.34 Aplikasi kontroler integral

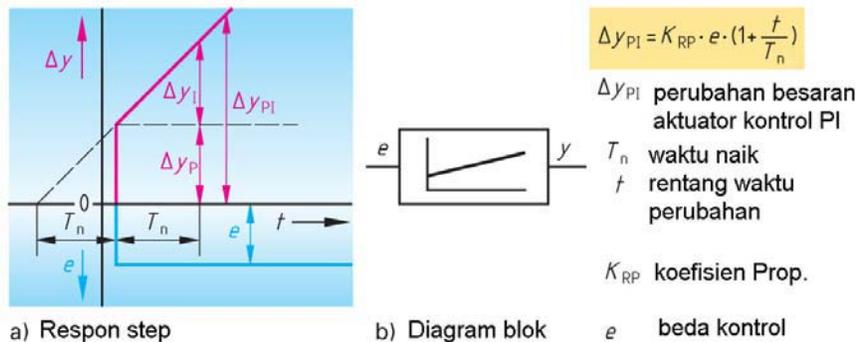
Jadi, jika selisih acuan dengan output nyata besar maka perubahan nilai output juga besar, artinya aktuator akan “mengejar” selisih tersebut, sehingga diharapkan selisihnya semakin kecil. Karakteristik dan diagram blok kontroler integral diperlihatkan pada **gambar 12.33**.

Dibandingkan dengan kontroler proporsional, pemakaian kontroler integral relatif lebih baik dalam hal memperkecil selisih antara masukan acuan dengan output nyata. Dengan demikian, kontroler integral akan mendorong sistem yang

Dalam sistem tersebut, operasi buka tutup katup dilakukan oleh motor listrik. Torsi motor yang dihasilkan bergantung kepada nilai selisih antara acuan ( $y_h$ ) dengan output nyata ( $y$ ) yang diukur melalui pelampung. Semakin besar selisih tersebut, yaitu apabila kecepatan berkurangnya air semakin besar (misalnya saat pemakaian air yang banyak), maka torsi motor akan semakin besar dan mempercepat buka katup, sehingga air akan semakin banyak mengalir. Dengan demikian diharapkan tangki air akan terisi air lagi secara cepat sampai ketinggian yang diinginkan.

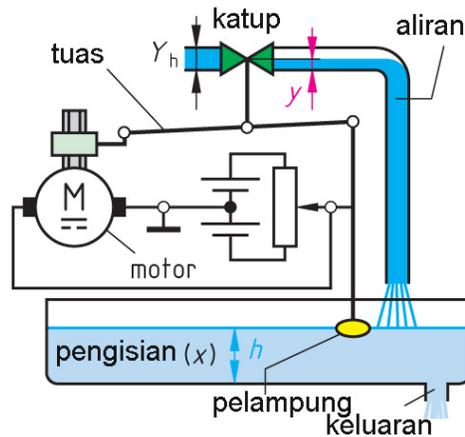
## 12.9. Kontroler Proporsional Integral (PI)

Kontroler *PI* merupakan gabungan fungsi dari kontroler Proporsional dan Integral. Penggabungan ini untuk menutupi kekurangan kontroler *P* yang relatif lambat responnya, sementara kontroler *P* digunakan untuk mempertahankan agar kontroler masih merespon meskipun untuk nilai selisih yang kecil. Respon sistem terhadap input tangga (*step*) dan diagram blok dari kontroler ini diperlihatkan pada **gambar 12.35**.



Gambar 12.35 Kontroler Proporsional Integral

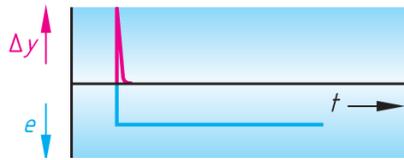
Aplikasi tipe kontroler ini diperlihatkan pada **gambar 12.36**. Pada sistem ini, buka tutup katup berlangsung atas dasar data output nyata yang diukur melalui pelampung dan torsi motor. Torsi motor berubah berdasarkan nilai selisih antara ketinggian air nyata ( $y$ ) dan tinggi air yang diinginkan ( $y_h$ ). Kombinasi dua mode pengontrolan ini menghasilkan operasi katup yang efektif, karena buka tutupnya menyesuaikan dengan kondisi air yang ada dalam tangki.



Gambar 12.36 Aplikasi Kontroler PI

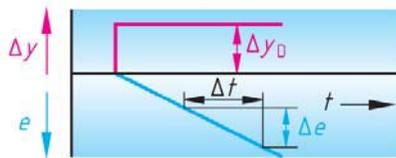
## 12.10. Kontroler Derivatif (D)

Penggunaan kontroler P saja dalam sistem kontrol kadang-kadang menyebabkan respon sistem melebihi input acuannya. Misalnya level air dalam tangki melebihi dari tinggi yang diinginkan. Keadaan ini disebut *overshoot*.



Gambar 12.37 Respon kontroler derivatif untuk sinyal step

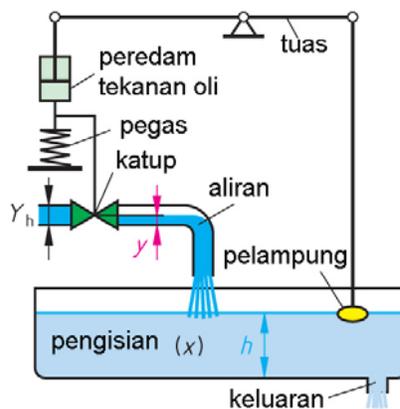
Untuk mengurangi atau menghindari kondisi ini maka digunakan kontroler tipe derivatif. Input ke kontroler derivatif berupa perubahan selisih antara output nyata dan masukan acuannya atau kecepatan *error*, sehingga apabila selisih antara output nyata dan masukan acuannya semakin besar maka kontroler mengirimkan sinyal ke aktuator yang semakin besar pula.



Gambar 12.38 Respon kontroler derivatif untuk sinyal lereng

Dengan demikian, nilai output yang melebihi nilai acuannya ditekan sekecil mungkin. Respon kontroler ini untuk input tangga (*step*) dan input lereng (*ramp*) diperlihatkan pada **gambar 12.37** dan **gambar 12.38**.

Aplikasi kontroler ini diperlihatkan pada **gambar 12.39**. Pada sistem ini, buka tutup katup bergantung kepada perubahan nilai selisih antara tinggi air nyata yang diukur melalui pelampung ( $y$ ) dan tinggi air yang diinginkan ( $y_h$ ).

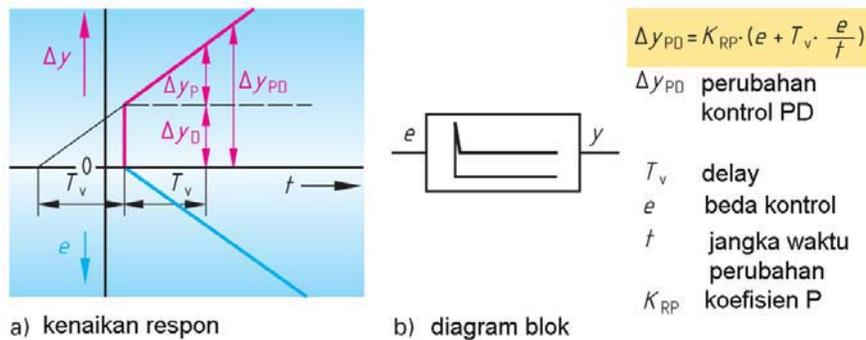


Gambar 12.39 Aplikasi Kontroler Derivatif

Dalam keadaan tangki kosong artinya selisihnya besar, maka katup akan membuka dengan cepat sehingga laju air masuk ke tangki semakin besar. Apabila keadaan air mendekati penuh, maka nilai selisihnya kecil, sehingga katup akan memperkecil *volume* air yang masuk ke dalam tangki.

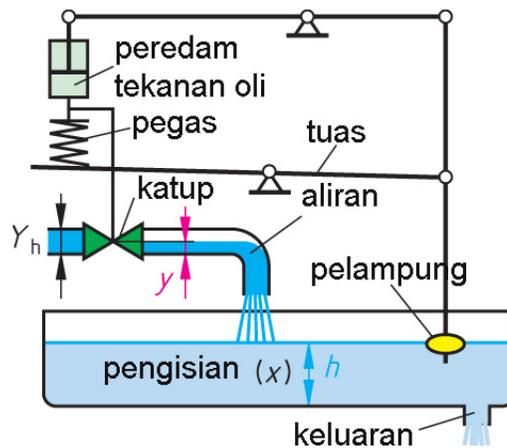
### 12.11. Kontroler Proporsional Derivatif (PD)

Karena kontroler derivatif mampu mengurangi *overshoot* yang terjadi dalam sistem kontrol, maka penggabungan dua tipe kontroler *P* dan *D* cukup efektif untuk mendapatkan respon sistem yang baik. Kontroler *PD* memadukan fungsi kontroler *P* dan *D*. Respon kontroler terhadap input lereng (*ramp*) dan diagram blok kontroler ini diperlihatkan pada **gambar 12.40**.



Gambar 12.40 Respon kontroler PD terhadap sinyal lereng

Apabila kontroler *PD* diterapkan pada pengaturan tinggi air maka buka tutup katupnya berdasarkan data selisih dan laju perubahan selisih antara tinggi air nyata ( $y$ ) dengan tinggi air yang diinginkan ( $y_h$ ), seperti diperlihatkan pada **gambar 12.41**.

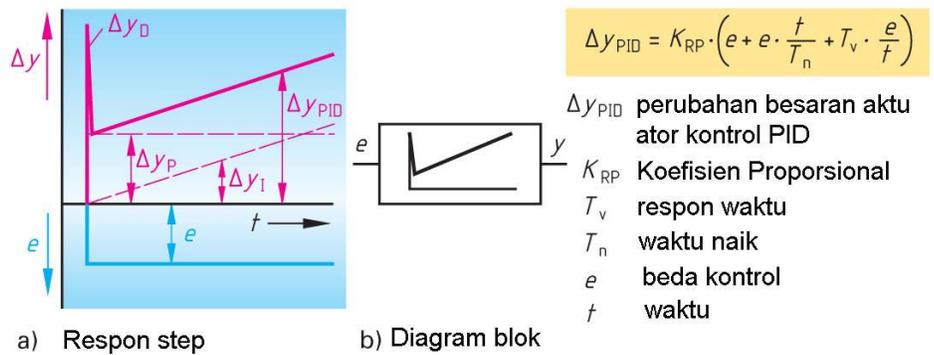


Gambar 12.41 Aplikasi Kontroler PD

Ketika pengisian air dalam tangki penampung mencukupi maka pelampung akan bergerak keatas dan menggerakkan dua tuas. Tuas atas menggerakkan piston dalam silinder yang akan menutup katup aliran air. Tuas bawah mengimbangi gerakan oleh tekanan pegas akibat dorongan piston.

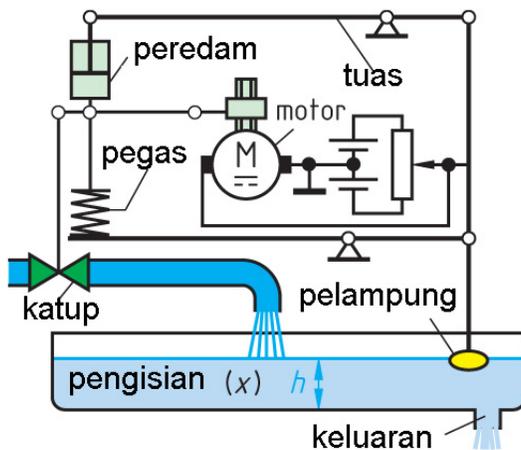
**12.12. Kontroler PID**

Dari uraian sebelumnya, karena tipe kontroler memiliki keunggulan dan kelemahan masing-masing, maka untuk mendapatkan hasil pengontrolan yang baik digunakan perpaduan tiga tipe kontroler tersebut. Kontroler ini memadukan fungsi tiga kontroler sebelumnya (P, I, dan D), sehingga disebut kontroler PID. Dengan kontroler PID diharapkan responnya sangat cepat (keunggulan kontroler P), errornya sangat kecil (keunggulan kontroler I), dan *overshoot*-nya kecil (keunggulan kontroler D). Respon kontroler terhadap input tangga (*step*) dan diagram bloknya diperlihatkan pada **gambar 12.42**.



Gambar 12.42 Respon kontroler PID terhadap sinyal step

Aplikasi kontroler PID dalam sistem kontrol tinggi air dalam tangki diperlihatkan pada **gambar 12.43**. Perhatikan kontroler ini merupakan gabungan kontroler PI yang ada digambar 12.26 dengan kontroler jenis Derivatif pada **gambar**



**12.36**. Pengisian permukaan air setinggi  $h$  akan di ikuti oleh pergerakan pelampung yang menggerakkan baik tuas, maupun potensiometer yang memberikan umpan balik pada motor DC yang mengisi air. Jika permukaan air sesuai dengan setting, maka pelampung akan bergerak keatas. Potensiometer akan memperkecil tegangan, motor DC akan mati. Sekaligus katup akan menutup aliran air yang menuju ke bak penampung bawah.

Gambar 12.43 Aplikasi kontroler PID

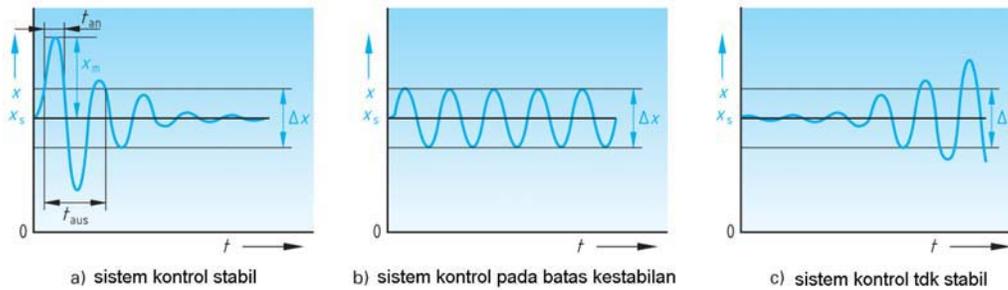
Untuk memudahkan analisis sistem kontrol biasanya digunakan analogi penggambaran sistem kontrol dengan rangkaian listrik. Tipe kontroler, diagram blok, analogi rangkaian listrik, hubungan antar variabelnya dicantumkan dalam tabel berikut.

Tabel 12.3. Aplikasi Op-Amp Sebagai Controller

Jenis kontrol	Diagram blok	Gambar rangkaian	Persamaan besaran aktuator	Persamaan
P			$\Delta y_P = K_{RP} \cdot e$	$K_{RP} = \frac{R_K}{R_e}$
I			$\Delta y_I = K_{IR} \cdot e \cdot t$	$K_{RI} = \frac{1}{R_e \cdot C_K}$
PI			$\Delta y_{PI} = K_{RP} \cdot e \cdot \left(1 + \frac{t}{T_n}\right)$	$K_{RP} = \frac{R_K}{R_e}$ $T_n = R_K \cdot C_K$
PD			$\Delta y_{PD} = K_{RP} \left( e + T_v \cdot \frac{e}{t} \right)$	$K_{RP} = \frac{R_K}{R_e}$ $T_v = R_e \cdot C_e$
PID			$\Delta y_{PID} = K_{RP} \left( e + e \cdot \frac{t}{T_n} + T_v \cdot \frac{e}{t} \right)$	$K_{RP} = \frac{R_K}{R_e}$ $T_n = R_K \cdot C_K$ $T_v = R_e \cdot C_e$

**12.13. Karakteristik Osilasi Pada Sistem Kontrol**

Ada tiga karakteristik osilasi apabila sebuah lingkaran (*loop*) diterapkan pada sistem kontrol, yaitu *loop* stabil, *loop* batas stabil, dan *loop* tidak stabil. Bentuk karakteristiknya diperlihatkan pada **gambar 12.44**.



Gambar 12.44 Karakteristik osilasi

Dalam sistem kontrol dengan *loop* stabil, respon sistemnya bisa mengikuti masukan acuannya dengan *error* semakin kecil dan menuju nol. Sementara untuk *loop* batas stabil, output sistemnya beresilasi terus-menerus, yang pada tingkat tertentu merusak komponen sistemnya.

Karakteristik *loop* yang tidak stabil adalah kualitas terburuk dari sistem kontrol. Dalam sistem tersebut, respon sistem melebihi dari nilai masukan acuannya dan semakin lama semakin besar. Hal ini tentu saja menyebabkan kerusakan dalam sistem. Misalnya pada pengaturan kecepatan motor arus searah terjadi *loop* tidak stabil maka motor berputar semakin lama semakin besar sampai melebihi batas kecepatan nominalnya yang tercantum dalam *nameplate*-nya. Tentu saja yang terjadi adalah motor menjadi rusak karena terjadi panas berlebih dalam komponen motor tersebut.

**12.14. Seleksi Tipe Kontroler Untuk Aplikasi Tertentu**

Dalam prakteknya, penggunaan tipe kontroler sangat bergantung kepada jenis aplikasi yang akan menggunakan kontroler dalam realisasinya. Selain pertimbangan ekonomis, hal-hal teknis berkaitan dengan karakteristik sistem, sifat-sifat fisis dari besaran yang dikontrol, dan kemudahan dalam realisasi menentukan tipe kontroler yang digunakan dalam aplikasi tersebut. Berikut adalah tabel perbandingan pemilihan tipe kontroler untuk aplikasi tertentu.

Tabel 12.4. Perbandingan jenis kontroler untuk masing-masing aplikasi

Sistem yang dikontrol		Kontroler					
Jenis	Contoh	P	I	PI	PD	PID	ON-OFF
$P_0$	Aliran cairan	-	++	++	-	-	-
$P_{T1}$	Tekanan	+(S), ++(F)	+	+(F), ++(S)	+	-	+
$P_{Tn}$	Temperatur	-	-	+	+	++	+
$P_{Tt}$	Perpindahan massa	-	+	++	-	-	-
$I_0$	Level ketinggian air	+	--	+	-	-	+
$I_{T1}$	level ketinggian minyak	+	--	+(S), ++(F)	+	+(F), ++(S)	+

-- tidak stabil, - tidak layak, + layak, ++ direkomendasi, (F) referensi, (S) gangguan

**12.15. Optimisasi Kontroler**

Dalam menerapkan tipe kontroler untuk aplikasi tertentu, beberapa parameter yang harus diperhatikan adalah konstanta waktu dari masing-masing tipe kontroler, waktu tunda (*delay time*), dan waktu menetap (*settling time*)nya. Ada dua pendekatan yang cukup terkenal dan praktis (*rule of thumb*) dalam menentukan nilai optimal dari suatu parameter relatif terhadap parameter lainnya, yaitu pendekatan *Chien/Hornes/Reswick* dan pendekatan *Ziegler/Nichols*. Nilai optimal masing-masing parameter tersebut diperlihatkan pada tabel berikut.

Tabel 12.5. Parameter controller dengan pendekatan Chien/Hornes/Reswick

Kontroller		Toleransi 20% diatas besaran		Operasi non-periodik dari sistem kontrol	
Jenis	Parameter	Gangguan	Referensi	Gangguan	Referensi
P	$K_{RP}$	$0,7 \cdot \frac{1}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$0,7 \cdot \frac{1}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$0,3 \cdot \frac{1}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$0,3 \cdot \frac{1}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$
PI	$K_{RP}$	$0,7 \cdot \frac{1}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$0,6 \cdot \frac{1}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$0,6 \cdot \frac{1}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$0,35 \cdot \frac{1}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$
	$T_n$	$2,3 \cdot T_u$	$T_g$	$4 \cdot T_u$	$1,2 \cdot T_g$
PID	$K_{RP}$	$1,2 \cdot \frac{1}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$0,95 \cdot \frac{1}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$0,95 \cdot \frac{1}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$0,6 \cdot \frac{1}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$
	$T_n$	$2 \cdot T_u$	$1,35 \cdot T_g$	$2,4 \cdot T_u$	$T_g$
	$T_v$	$0,42 \cdot T_u$	$0,47 \cdot T_u$	$0,42 \cdot T_u$	$0,5 \cdot T_u$

K<sub>rp</sub> Konstanta Proporsional, K<sub>s</sub> konstanta penguatan Proporsional, T<sub>n</sub> waktu reset kontroler integral, T<sub>g</sub> waktu kompensasi Tu waktu tunda, T<sub>v</sub> waktu reset kontroler derivatif.

Jika sistem kontrol mengandung waktu mati (dead time) T<sub>t</sub>, maka parameter T<sub>u</sub> diganti dengan T<sub>u</sub> + T<sub>t</sub>

Jika sistem kontrol tanpa kompensasi maka parameter T<sub>g</sub> dihilangkan dari persamaan.

Tabel 12.6. Parameter Ziegler-Nichols

Tabel 3 Parameter Ziegler -Nichols			
Kontroler	$K_{RP} \leq$	$T_n \geq$	$T_v \leq$
P	$0,5 \cdot K_{RP0}$	-	-
PI	$0,45 \cdot K_{RP0}$	$0,85 \cdot T_0$	-
PD	$0,8 \cdot K_{RP0}$	-	$1,2 \cdot T_0$
PID	$0,6 \cdot K_{RP0}$	$0,5 \cdot T_0$	$0,12 \cdot T_0$

**Contoh :** Sebuah sistem kontrol suhu membutuhkan spesifikasi kontroler sebagai berikut : waktu tunda  $T_u = 60$  detik, waktu akhir respon kontroler (*settling time*)  $T_g = 600$  detik, dan konstanta proporsional  $K_S = 10$  K/A. Dengan kriteria 20 % osilasi dari nilai output kontrolernya, tentukan nilai parameter  $K_{RP}$ ,  $T_n$ , dan  $T_v$  apabila dipilih kontroler PID untuk merealisasikan kontroler tersebut.

**Jawab :** Dari tabel,  $K_{RP} = 1,2 \times \frac{1}{K_S} \times \frac{T_g}{T_u} = 1,2 \times \frac{1}{10} \times \frac{600}{60} = 1,2$  A/K ;  
 $T_n = 2T_u = 2 \times 60 = 120$  detik ; dan  $T_v = 0,42T_u = 0,42 \times 60 = 25,2$  detik.

### 12.16. Elektropneumatik

Di industri banyak digunakan komponen-komponen yang merupakan kombinasi elektrik dan pneumatik, yang disebut elektropneumatik. Pneumatik dapat digunakan untuk mengontrol daya dengan bantuan sinyal listrik (biasanya digunakan 24 V DC). Sinyal-sinyal DC tersebut diaktifkan melalui rangkaian logika. Rangkaian dari komponen-komponen tersebut bekerja dengan energi listrik.



Gambar 12.45. Komponen elektropneumatik

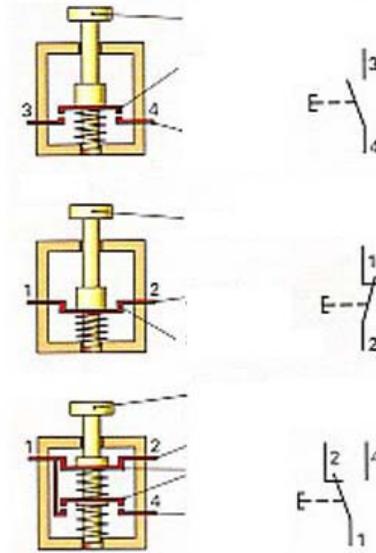
## 12.17. Komponen Elektropneumatik

Di bagian aktuator, pneumatik digunakan seperti pada silinder dan throttle dan katup penghalang. Bagian-bagian tersebut bekerja secara elektropneumatik. Komponen elektropneumatik terdiri bagian elektrik, elektropneumatik dan bagian mekanik.

### 12.17.1. Bagian Elektrik

Bagian ini biasanya berupa rangkaian tertutup dan mempunyai bagian output yang digunakan untuk menyambungkannya dengan komponen atau bagian lain sesuai dengan kebutuhan.

Di pasaran biasanya tersedia dalam bentuk saklar tekan (*pushbutton*) atau selector switch, *normally open*, *normally closed* atau dalam bentuk toggle **gambar-12.46** Untuk model selector switch, bekerja berdasarkan mekanis, dan akan tetap pada posisinya sampai ada yang mengubahnya.

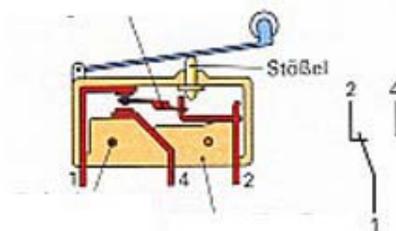


Gambar 12.46. Tombol NO,NC dan toggle

Misalnya dia akan tetap off sebelum ada orang yang mengubah posisi saklar menjadi on. Sedangkan untuk model saklar tekan, akan bekerja selama beberapa waktu saja setelah saklar tersebut ditekan. Untuk tipe toggle, saklar akan berubah fungsi setiap kali ditekan. Misalnya satu kali ditekan dia akan tertutup (dan terus bertahan) dan ditekan lagi saklar akan terbuka.

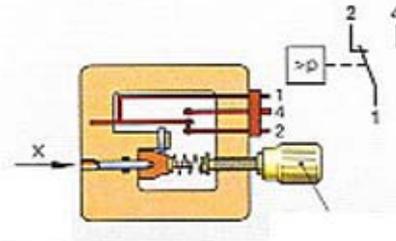
### 12.17.2. Sensor-sensor

Melalui pengesetan pada sensor, informasi-informasi dari luar yang menunjukkan kondisi bagian yang dikontrol (misalnya perubahan tekanan, tegangan, posisi silinder, dan sebagainya) dapat diteruskan ke bagian pengontrol.



Gambar 12.47 Limit switch

Sebuah *limit-switch* mekanik **gambar-12.47** dapat di set pada posisi tertentu, sehingga ketika ada benda kerja yang menyentuh *limit-switch* tersebut, maka dia akan mengeluarkan sinyal untuk mengontrol kerja mesin atau bagian dari mesin. *Limit-switch* biasanya berfungsi sebagai pembuka atau penyambung dan pengubah aliran arus.

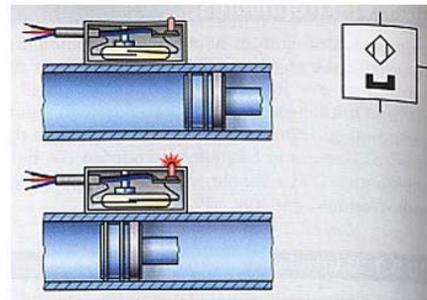


Gambar 12.48 Limit switch tekanan

Saklar tekanan biasanya berfungsi sebagai penyambung, pemutus atau pengubah aliran arus dengan cara mengeset saklar pada tekanan tertentu. Ketika tekanan mencapai nilai seting yang ditetapkan, maka saklar akan terbuka atau tertutup, atau mengalihkan arah arus. Tekanan input didapat dari sebuah piston yang akan menghasilkan daya tekan. Daya tekan tersebut dapat diatur melalui sebuah tombol putar **gambar-12.48**. Ketika ada tekanan melebihi nilai setingnya, maka *limit switch* akan bekerja.

Saat ini banyak digunakan saklar tekanan yang bekerja secara elektronis. Saklar tekanan elektronis bekerja melalui tekanan yang terjadi pada membran.

Saklar magnet jenis *proximity* juga dapat diset pada posisi tertentu dalam silinder **gambar 12.49**. Biasanya rumah kontak saklar ini berupa diode jenis LED yang akan langsung menyala saat terjadi kontak (saklar tersambung).



Gambar 12.49 Proximity switch terpasang pada silinder

Karakteristik penting saklar jenis ini ialah:

- Bekerja tanpa memerlukan daya
- Waktu pensaklaran yang singkat (sekitar 0.2 ms).
- Bebas waktu tunggu
- Masa pakainya panjang
- Sensitifitasnya terbatas.
- Dengan medan magnet yang tinggi komponen ini tidak dapat diset.
- Hanya memerlukan sedikit instalasi

Saklar proximity merupakan sensor non-kontak, bekerja berdasarkan induksi magnet yang ditimbulkan oleh belitan pada kontak-dalam. Saklar ini dapat berfungsi sebagai pemutus, penyambung atau pengubah arah arus. Medan magnet biasanya segera berintegrasi dengan badan piston, sehingga kontak bergerak.

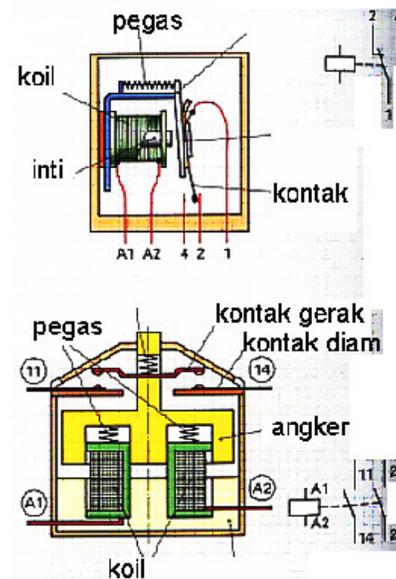
### 12.17.3. Relay dan Kontaktor

Relay dan kontaktor merupakan saklar yang bekerja berdasarkan prinsip elektro-magnetik yang terjadi pada kontaktor-kontaktornya **gambar 12.50**. Arus masuk melalui belitan eksitasi (terminal A1 dan A2). Jangkar akan bergerak dan kontak bekerja. Jika aliran arus pada jangkar terputus, maka sambungan akan terputus pula.

Relay dan kontaktor bekerja dengan prinsip yang sama. Oleh karena itu gambar potongan saklarnya digambarkan sama. Relay biasanya bekerja dengan daya rendah (sekitar 1kW, kontaktor bekerja dengan daya yang lebih besar sampai 100 kW).

Relay bekerja dengan tegangan bebas. Ini dimaksudkan relay dapat bekerja dengan tegangan yang berbeda-beda. Relay banyak digunakan untuk berbagai jenis kontrol, pengaturan dan pengecekan, seperti:

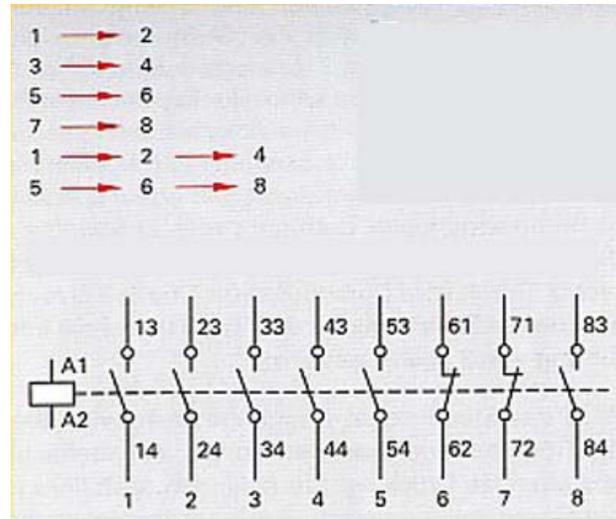
- Relay menunjukkan gambaran antara sinyal dan daya
- Dapat bekerja dengan tegangan yang berbeda-beda
- Relay dapat bekerja dengan tegangan DC maupun AC
- Relay dapat bekerja dengan sinyal-kuadrupel
- Relay juga dapat bekerja dengan delay sinyal.



Gambar 12.50 Konstruksi Relay dan kontaktor

Relay tersedia dalam tipe normally-open (terbuka), tertutup, atau sebagai pengubah aliran arus **gambar-12.51** menunjukkan rangkaian kontak atau sambungan sebuah relay.

- Belitan untuk arus eksitasi digambarkan sebagai A1 dan A2
- Relai digambarkan sebagai K1, K2 dan seterusnya.
- Rangkaian kontak relay digambarkan melalui angka-angka yang terdiri dari dua deret. Deret pertama merupakan order atau tingkatan, deret kedua merupakan jenis deret kontak.

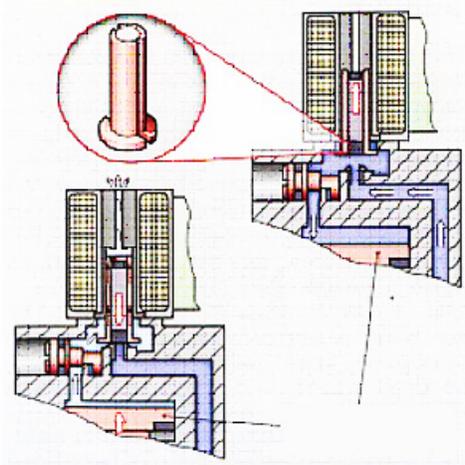


Gambar 12.51. Kontaktor dengan kontak utama dan kontak bantu

#### 12.17.4. Katup Magnetik

Katup magnetik merupakan konverter elektromagnetik, yang meng-gambarkan adanya bagian kontrol mekanis dan elektronik. Katup magnetik terdiri dari belitan magnet (ini adalah elemen elektronik) dan katup pneumatik. Arus listrik mengalir melalui belitan magnet, yang akan membangkitkan medan elektro magnetik, sehingga dapat menarik jangkar. Jangkar terhubung dengan pendorong katup, dimana tekanan udara dikontrol. Didalam pendorong katup terdapat gerbang jangkar yang akan bergerak, sehingga dapat mengubah status sambungan (tersambung atau terputus).

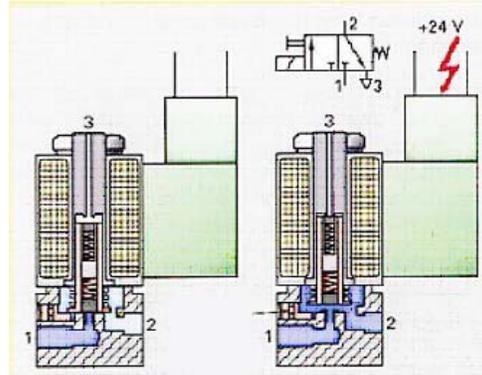
Prinsip kerja katup kontrol 3/2 **gambar 12.51**: dimulai dari penyetelan dasar katup, yaitu dengan menutup aliran udara dari 1 ke 2. Magnet yang dibangkitkan oleh belitan akan menaikkan jangkar ke atas, sehingga akan terjadinya aliran udara bebas dari 1 ke 2. Selanjutnya, pengaliran udara-3 dalam jangkar akan menghalangi udara dari atas ke bawah. Oleh karena itu tidak ada arus lagi yang mengalir melalui belitan (spul) dari jangkar ke bawah dan aliran dari 1 ke 2 juga terhalang; dalam waktu yang bersamaan akan terjadi



Gambar 12.52 Katup Magnetik

pertukaran udara dari 3 ke 2. dengan bantuan tangan, poros elektromagnet dapat berputar, dan ini akan mempengaruhi adanya pertukaran udara tersebut. Di dalam elektropneumatik terdapat valve yang dapat dikontrol.

Keunggulan penggunaan kontrol dengan elektropneumatik adalah belitan magnet relatif berukuran kecil, sehingga hanya memerlukan arus dan daya listrik kecil, menunjukkan dasar fungsi sebuah elektropneumatik **gambar-12.52**. Sinyal listrik akan mengakibatkan jangkar bekerja membuka katup kontrol dan ini akan menimbulkan perubahan tekanan pada piston, sehingga katup akan terbebas dari kontrol tekanan.



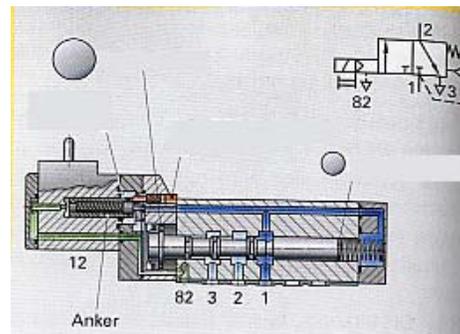
Gambar 12.53. Batang jangkar katup magnetik

**Katup Magnetik 3/2 dengan Penyetelan Balik.**

**Gambar-12.53** menunjukkan penyetelan dasar dari katup magnetik 3/2. Disini aliran udara dari jalur 1 ke 2 dihalangi dengan mengontrol katup magnetik 3/2, sementara udara dapat masuk melalui jalur 3 ke 2. Tekanan udara pada jalur 1 akan mengakibatkan lempeng penahan bergerak ke kiri dan jangkar akan bergerak ke depan. Melalui eksitasi belitan magnet, maka jangkar akan bergerak ke kiri sehingga kedalamannya akan bertambah.

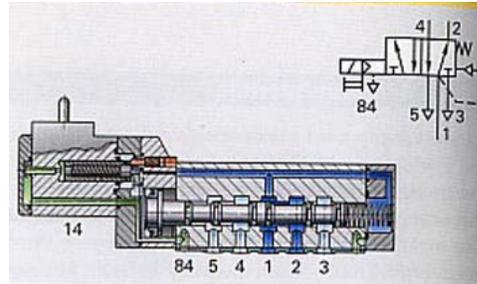
Oleh karena itu, terdapat aliran tekanan udara pada lempeng yang dikontrol, dan akan mengakibatkan terjadinya tekanan pada piston ke arah kanan, sehingga udara dapat mengalir dari jalur 1 ke 2. Pada saat ini aliran udara masuk dari jalur 3 ke 1 terhalang.

Pada saat sinyal kontrol bekerja, akan ada tekanan udara pada lempeng kontrol, yang me-nyebabkan piston bergerak ke kiri, dan katup akan teraliri udara melalui lubang di dalam jangkar di jalur 82. Tekanan udara juga dapat diatur melalui perangkat yang dapat diatur dengan tangan.



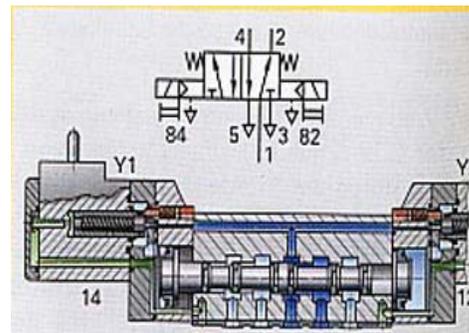
Gambar 12.54. Katup magnetik 3/2

**Katup magnetik 5/2** mempunyai perbedaan bentuk fisik jika dibandingkan katup magnetik 3/2 **gambar 12.54**. Secara prinsip kedua katup tersebut mempunyai cara kerja yang sama, yaitu perlu belitan magnet yang tereksitasi untuk menggerakkan piston, tetapi untuk katup ini tidak ada definisi penyetelan dasar.



Gambar 12.55. Katup magnetik 5/2

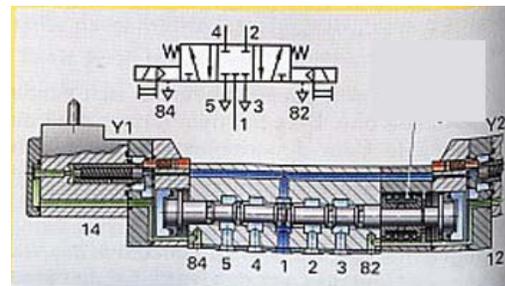
**Katup Magnetik Impulse 5/2 gambar 12.55** mempunyai prinsip kontrol yang sama dengan katup katup magnetik yang dijelaskan sebelumnya. Perbedaan tersebut terletak pada sinyal listrik pembangkit eksitasi pada belitan magnet. Disini, belitan magnet hanya memerlukan impuls yang pendek, untuk mempertahankan piston pada posisi tertentu.



Gambar 12.56. Katup magnetik impulse 5/2

**Katup magnetik jalur 5/3.**

**Gambar 12.56** menunjukkan penyetelan dasar katup 5/3 (penyetelan halus di-offkan), yaitu dengan mencegah aliran udara dari jalur 1 ke 2 dan dari 1 ke 4. Lubang yang menghubungkan kedalaman jangkar-jangkar akan berada pada tekanan di port 1. Melalui eksitasi sebuah magnet akan mulai dijelaskan prinsip pengontrolan katup dan piston yang akan mengubah posisi saklar. Dengan menggunakan eksitasi magnet akan memungkinkan feder pusat berada di posisi tengah.



Gambar 12.57. Katup magnetik 5/3

Pengaturan katup mendapat masukan udara dari jalur 82 atau 84. yang perlu diperhatikan, bahwa untuk mengatur gerakan katup diperlukan sinyal kontrol untuk Y1 hingga Y2, tanpa mempertahankan impuls katup dalam memori. Jika ada sinyal kontrol, maka katup akan berada di tengah.

**12.18. Rangkaian Dasar**

Seperti halnya pada pneumatik, pada elektropneumatikpun dapat dibuat rangkaian dasar yang harus di set secara bersama-sama. Disini kembali berlaku prinsip-prinsip perancangan rangkaian yaitu dengan memper hatikan fungsi dan karakteristik penyetelan.

Komponen-komponen harus di-tangani dengan baik sehingga dan berfungsi baik dan dapat direncana kan pengontrolan yang sesuai.

**12.18.1. Operasi Maju dan Mundur Silinder**

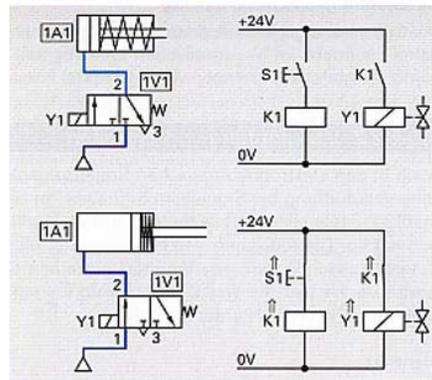
Cara kerja silinder sangat berbeda dengan cara kerja pneumatik. Disini tidak ada pengaturan secara langsung. Dalam praktik, pengaturan dilakukan melalui relay. Kontrol jenis ini mempunyai keunggulan, bahwa arus relay dapat digunakan untuk meng-aktifkan perangkat lainnya.

**Operasi satu arah dari Silinder**

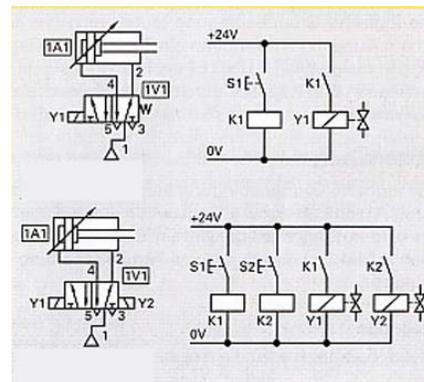
Dengan mengoperasikan saklar-1 **gambar 12.56** maka relay K1 akan energized dan ini akan meng-aktifkan kontak relay pada lead arus-2 serta katup magnetik Y1 di bagian silinder 1V1, sehingga jalur katup 3/2 dapat memberikan pengontrolan. Silinder 1A1 akan bergerak ketika S1 dioperasikan lagi dan mencapai ujung tabung ketika S1 dioperasikan untuk waktu yang diperlukan silinder bergerak dari ujung ke ujung tabung.

**Silinder dengan Operasi Ganda**

Disini juga akan dijelaskan kemungkinan-kemungkinan peng-aturan yang lebih banyak karena menggunakan pengaturan tekanan udara secara ganda. Silinder pada **gambar 12.57** atas hanya akan bergerak ketika S1 ditekan untuk waktu selama silinder bergerak.



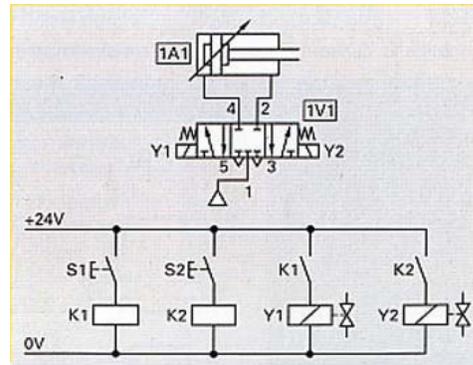
Gambar 12.58. Silinder tunggal dengan dgn katup magnetik 3/2



Gambar 12.59. Silinder operasi ganda katup 5/2

**Gambar-12.57** bawah menunjukkan bahwa silinder 1A1 bergerak berdasarkan impuls yang diperoleh dari S1 dan S2 yang ditekan sesaat saja. Katup path 5/2 1V1 merupakan sebuah katup dengan memori.

Oleh karena itu, untuk meng-operasikannya hanya diperlukan impuls yang pendek saja periodenya. S1 dapat dioperasikan kembali ketika S2 dioperasikan, sehingga belitan magnet Y1 dan Y2 akan aktif, dan pengaturan katup 1V1 tidak dapat dialihkan. Impuls 1V1 tersimpan oleh sinyal yang pertamakali datang.



Gambar 12.60. Silinder ganda dengan katup 5/3

## 2.19. Rangkuman

## 2.20. Soal-soal

## **BAB 13**

### **GENERATOR SINKRON**

**Daftar Isi :**

13.1. Pendahuluan .....	13-1
13.2. Konstruksi Mesin Sinkron .....	13-2
13.3. Prinsip Kerja .....	13-10
13.4. Generator Tanpa Beban .....	13-12
13.5. Generator Berbeban .....	13-13
13.6. Menentukan Resistansi dan Reaktansi .....	13-15
13.7. Pengaturan Tegangan .....	13-18
13.8. Kerja Parallel Generator .....	13-23
13.9. Rangkuman .....	13-26
13.10. Soal-soal .....	13-27

### 13.1. Pendahuluan

Sebagian besar energi listrik yang dipergunakan oleh konsumen untuk kebutuhan sehari-hari dihasilkan oleh generator Sinkron Phasa banyak (*polyphase*) yang ada di pusat pembangkit tenaga listrik. Generator Sinkron yang dipergunakan ini mempunyai rating daya dari ratusan sampai ribuan Mega-Volt-Ampere (MVA).

Disebut Mesin Sinkron, *karena bekerja pada kecepatan dan frekuensi konstan dibawah kondisi " Steady state "*. Mesin Sinkron bisa dioperasikan baik sebagai generator maupun motor.

Mesin Sinkron bila difungsikan sebagai motor berputar dalam kecepatan konstan, apabila dikehendaki kecepatan yang bersifat variabel, maka motor Sinkron dilengkapi dengan dengan pengubah frekuensi seperti "Inverter" atau " Cyclo-converter".

Sebagai generator, beberapa Mesin Sinkron sering dioperasikan secara paralel, seperti di pusat-pusat pembangkit. Adapun tujuan dari paralel generator adalah menambah daya pasokan dari pembangkit yang dibebankan ke masing-masing generator yang dikirimkan ke beban.

Ada dua struktur medan magnet pada Mesin Sinkron yang merupakan dasar kerja dari Mesin tersebut, yaitu *kumparan yang mengalirkan penguatan DC dan sebuah jangkar tempat dibangkitkannya ggl arus bolak-balik*. Hampir semua Mesin Sinkron mempunyai jangkar diam sebagai stator dan medan magnet berputar sebagai rotor. Kumparan DC pada medan magnet yang berputar dihubungkan pada sumber listrik DC luar melalui Slipring dan sikat arang, tetapi ada juga yang tidak mempergunakan sikat arang disebut "brushless excitation".

### 13.2 Konstruksi Mesin Sinkron

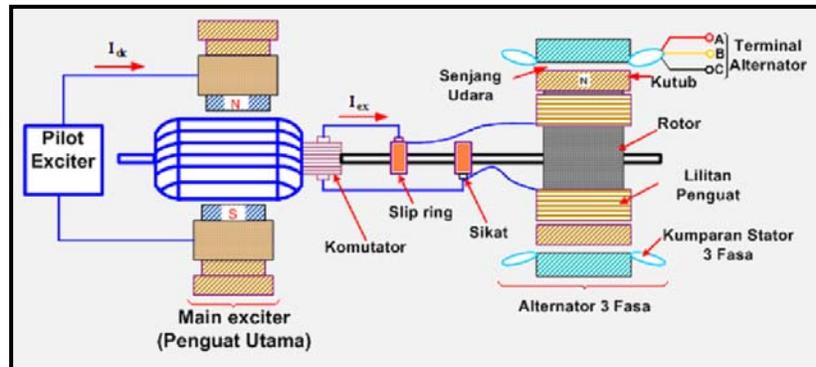
Ada dua struktur medan magnet pada Mesin Sinkron yang merupakan dasar kerja dari Mesin tersebut, yaitu *kumparan yang mengalirkan penguatan DC dan sebuah jangkar tempat dibangkitkannya ggl arus bolak-balik*. Hampir semua Mesin Sinkron mempunyai belitan ggl berupa stator yang diam dan struktur medan magnet berputar sebagai rotor. Kumparan DC pada struktur medan yang berputar dihubungkan pada sumber luar melalui slipring dan sikat arang, tetapi ada juga yang tidak mempergunakan sikat arang yaitu sistem " *brushless excitation*".

Konstruksi dari sebuah Mesin Sinkron secara garis besar adalah sebagai berikut :

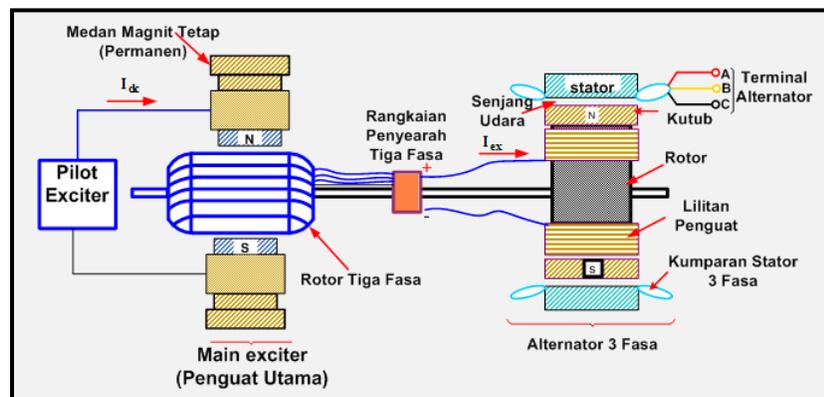
13.2.1. Bentuk Penguatan

Seperti telah diuraikan diatas, bahwa untuk membangkitkan flux magnetik diperlukan penguatan DC. Penguatan DC ini bisa diperoleh dari generator DC penguatan sendiri yang seporos dengan rotor Mesin Sinkron.

Pada Mesin Sinkron dengan kecepatan rendah, tetapi rating daya yang besar, seperti generator Hydroelectric, maka generator DC yang digunakan tidak dengan penguatan sendiri tetapi dengan " Pilot Exciter" sebagai penguatan atau menggunakan magnet permanen.



Gambar 13.1  
Generator Sinkron Tiga Fasa dengan Penguatan Generator DC "Pilot Exciter".



Gambar 13.2  
Generator Sinkron Tiga Fasa dengan Sistem Penguatan "Brushless Exciter System".

Alternatif lainnya untuk penguatan eksitasi adalah menggunakan Diode silikon dan Thyristor. Dua tipe sistem penguatan " Solid state" adalah :

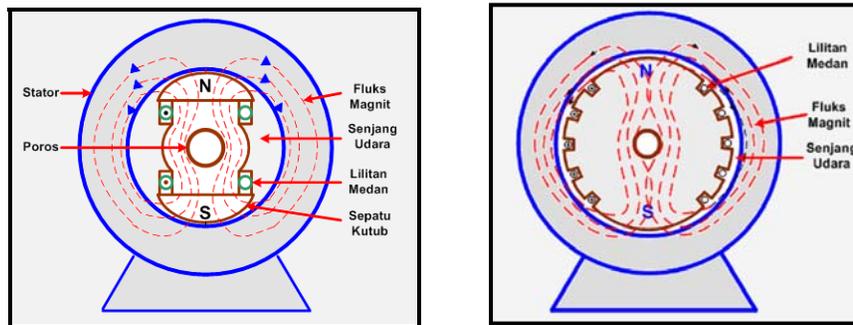
- Sistem statis yang menggunakan Diode atau Thyristor statis, dan arus dialirkan ke rotor melalui Slipring.

## Generator Sinkron

- “*Brushless System*”, pada sistem ini penyearah dipasang diporos yang berputar dengan rotor, sehingga tidak dibutuhkan sikat arang dan slipring.

### 13.2.2. Bentuk Rotor

Untuk medan rotor yang digunakan tergantung pada kecepatan Mesin, Mesin dengan kecepatan tinggi seperti turbo generator mempunyai bentuk silinder **gambar 13.3a**, sedangkan Mesin dengan kecepatan rendah seperti *Hydroelectric* atau Generator Listrik Diesel mempunyai rotor kutub menonjol gambar 13.3b.



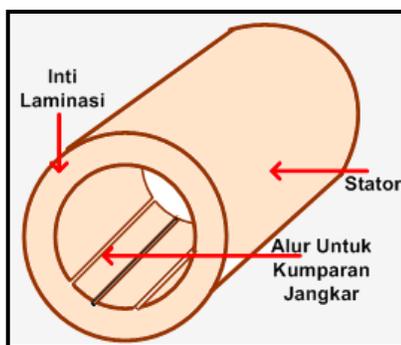
(a) Rotor Kutub onjol

(b) Rotor kutub Silinder

Gambar 13.3 Bentuk Rotor

### 13.2.3. Bentuk Stator

Stator dari Mesin Sinkron terbuat dari bahan ferromagnetik yang berbentuk laminasi untuk mengurangi rugi-rugi arus pusar. Dengan inti ferromagnetik yang bagus berarti permeabilitas dan resistivitas dari bahan tinggi.



Gambar 13.4  
Inti Stator dan Alur pada Stator

**Gambar 13.4** memperlihatkan alur stator tempat kumparan jangkar. Belitan jangkar (stator) yang umum digunakan oleh Mesin Sinkron Tiga Fasa, ada dua tipe yaitu :

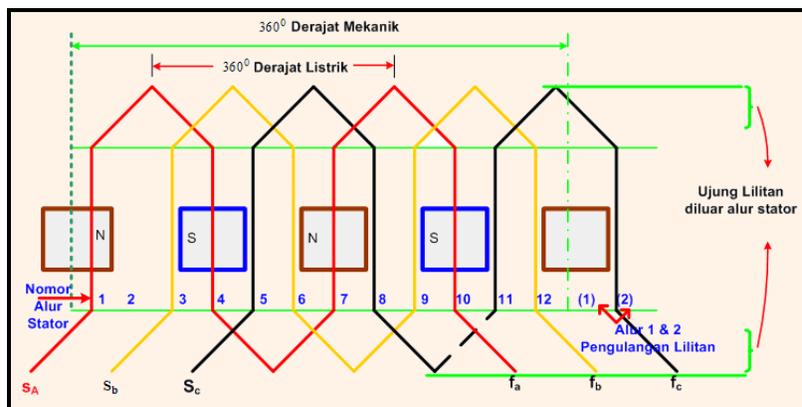
- a. Belitan satu lapis (*Single Layer Winding*).
- b. Belitan berlapis ganda (*Double Layer Winding*).

**13.2.4. Belitan Stator Satu Lapis**

Gambar 13.5 memperlihatkan belitan satu lapis karena hanya ada satu sisi lilitan didalam masing-masing alur. Bila kumparan tiga Phasa dimulai pada Sa, Sb, dan Sc dan berakhir di Fa, Fb, dan Fc bisa disatukan dalam dua cara, yaitu hubungan bintang dan segitiga.

Antar kumparan Phasa dipisahkan sebesar 120 derajat listrik atau 60 derajat mekanik, satu siklus ggl penuh akan dihasilkan bila rotor dengan 4 kutub berputar 180 derajat mekanis. Satu siklus ggl penuh menunjukkan 360 derajat listrik, adapun hubungan antara sudut rotor mekanis  $\alpha_{mek}$  dan sudut listrik  $\alpha_{lis}$ , adalah :

$$\alpha_{lis} = \frac{P}{2} \alpha_{mek}$$



Gambar 13.5 Belitan Satu Lapis Generator Sinkron Tiga Phasa

**Contoh :**

Sebuah generator Sinkron mempunyai 12 kutub. Berapa sudut mekanis ditunjukkan dengan 180 derajat listrik.

**Jawaban :**

Sudut mekanis antara kutub utara dan kutub selatan adalah :

$$\alpha_{mek} = \frac{360 \text{ sudut mekanis}}{12 \text{ kutub}} = 30^0$$

Ini menunjukkan 180 derajat listrik :

$$\alpha_{lis} = \frac{P}{2} \alpha_{mek} = \frac{12}{2} \times 30^0 = 180^0$$

## Generator Sinkron

Untuk menunjukkan arah dari putaran rotor ***gambar 13.6*** (searah jarum jam), urutan Phasa yang dihasilkan oleh suplai tiga Phasa adalah ABC, dengan demikian tegangan maksimum pertama terjadi dalam Phasa A, diikuti Phasa B, dan kemudian Phasa C.

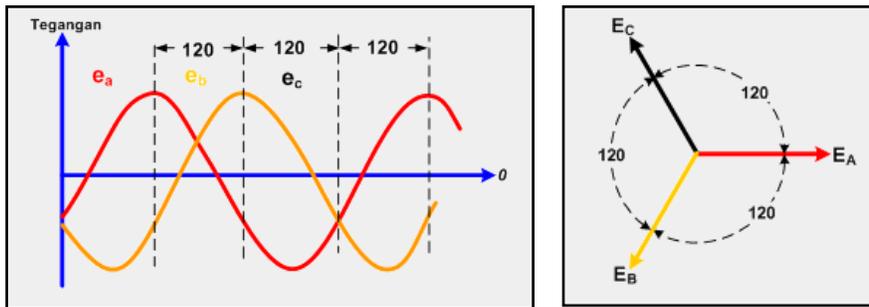
Kebalikan arah putaran dihasilkan dalam urutan ACB, atau urutan Phasa negatif, sedangkan urutan Phasa ABC disebut urutan Phasa positif.

Jadi ggl yang dibangkitkan sistem tiga Phasa secara simetris adalah :

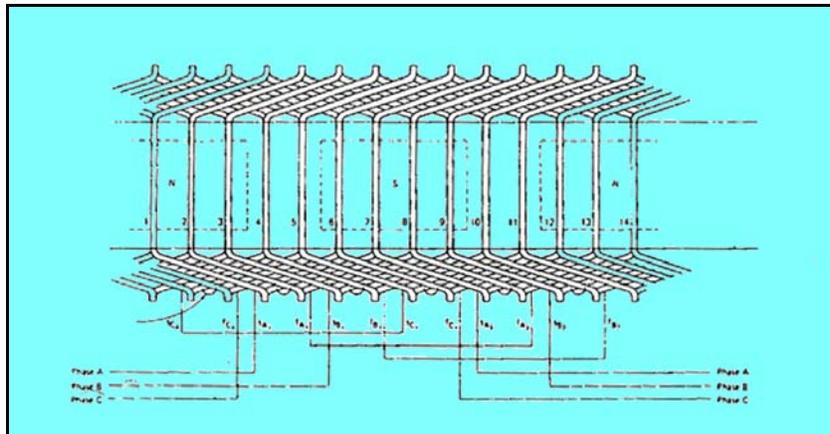
$$E_A = E_A \angle 0^0 \text{ Volt}$$

$$E_B = E_B \angle -120^0 \text{ Volt}$$

$$E_C = E_C \angle -240^0 \text{ Volt}$$



Gambar 13.6 Urutan Phasa ABC



Gambar 13.7 Belitan Berlapis Ganda Generator Sinkron Tiga Phasa

### 13.2.5. Belitan Berlapis Ganda

Kumparan jangkar yang diperlihatkan pada **gambar 13.5** hanya mempunyai satu lilitan per kutub per Phasa, akibatnya masing-masing kumparan hanya dua lilitan secara seri. Bila alur-alur tidak terlalu lebar, masing-masing penghantar yang berada dalam alur akan membangkitkan tegangan yang sama. Masing-masing tegangan Phasa akan sama untuk menghasilkan tegangan per peng-hantar dan jumlah total dari penghantar per Phasa.

Dalam kenyataannya cara seperti ini tidak menghasilkan cara yang efektif dalam penggunaan inti stator, karena variasi kerapatan flux dalam inti dan juga melokalisir pengaruh panas dalam daerah alur dan menimbulkan harmonik.

Untuk mengatasi masalah ini, generator praktisnya mempunyai *kumparan terdistribusi* dalam beberapa alur per kutub per Phasa. **gambar 5.7** memperlihatkan bagian dari sebuah kumparan jangkar yang secara umum banyak digunakan. Pada masing-masing alur ada dua sisi lilitan dan masing-masing lilitan memiliki lebih dari satu putaran. Bagian dari lilitan yang tidak terletak ke-dalam alur biasanya disebut “ *Winding Overhang*”, sehingga tidak ada tegang-an dalam winding overhang.

### 13.2.6. Faktor Distribusi

Seperti telah dijelaskan diatas bahwa sebuah kumparan terdiri dari sejumlah lilitan yang ditempatkan dalam alur se-cara terpisah. Sehingga, ggl pada terminal menjadi lebih kecil bila dibanding-kan dengan kumparan yang telah dipu-satkan. Suatu faktor yang harus dikalikan dengan ggl dari sebuah kumparan distribusi untuk menghasil-kan total ggl yang dibangkitkan disebut **faktor distribusi  $K_d$**  untuk kumparan. Faktor ini selalu lebih kecil dari satu.

Diasumsikan ada  $n$  alur per Phasa per kutub, jarak antara alur dalam derajat listrik, adalah :

$$\psi = \frac{180 \text{ derajat listrik}}{n \times m}$$

dimana  $m$  menyatakan jumlah Phasa.

Perhatikan **gambar 13.8**, disini diperlihatkan ggl yang diinduksikan dalam alur 2 akan tertinggal (lagging) dari ggl yang dibangkitkan dalam alur 1 sebesar  $\psi = 15$  derajat listrik, demikian pula ggl yang diinduksikan dalam alur 3 akan tertinggal  $2\psi$  derajat, dan seterusnya. Semua ggl ini ditunjukkan masing-masing oleh phasor  $E_1, E_2, E_3, \text{ dan } E_4$ . Total ggl stator per Phasa  $E$  adalah jumlah dari seluruh vektor.

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4$$

## Generator Sinkron

Total ggl stator E lebih kecil dibandingkan jumlah aljabar dari ggl lilitan oleh faktor.

$$Kd = \frac{\text{Jumlah Vektor}}{\text{Jumlah Aljabar}} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4}{4xE_{lilitan}}$$

Kd adalah faktor distribusi, dan bisa dinyatakan dengan persamaan :

$$Kd = \frac{\text{Sin}(1/2n\psi)}{n\text{Sin}(\psi/2)}$$

Keuntungan dari kumparan distribusi, adalah memperbaiki bentuk gelombang tegangan yang dibangkitkan, seperti terlihat pada **gambar 13.9**.

### 13.2.7. Faktor Kisar

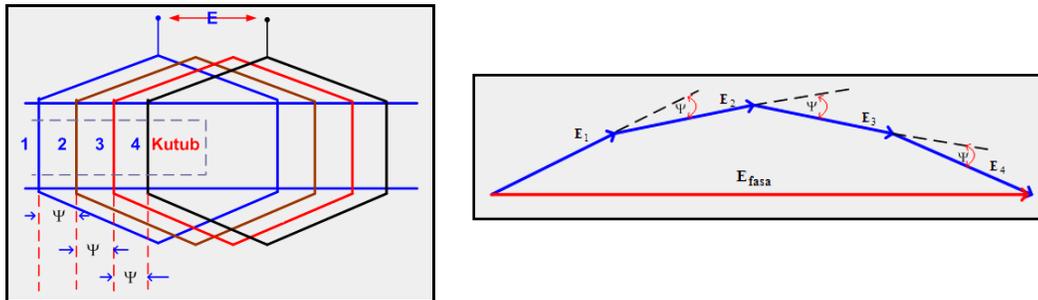
**Gambar 13.10**, memperlihatkan bentuk kisar dari sebuah kumparan, bila sisi lilitan diletakkan dalam alur 1 dan 7 disebut kisar penuh, sedangkan bila diletakkan dalam alur 1 dan 6 disebut kisar pendek, karena ini sama dengan 5/6 kisar kutub.

Kisar :

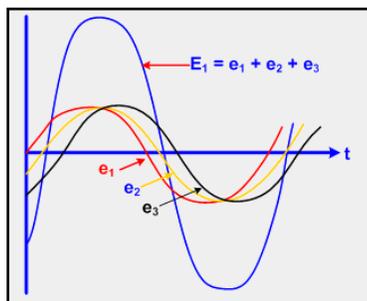
$$5/6 = 5/6 \times 180 \text{ derajat} = 150 \text{ derajat}$$

$$1/6 = 1/6 \times 180 \text{ derajat} = 30 \text{ derajat}$$

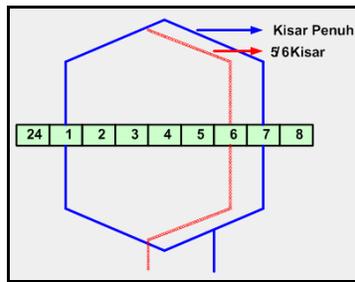
Kisar pendek sering digunakan, karena mempunyai beberapa keuntungan, diantaranya :



Gambar 13.8 Diagram Phasor dari Tegangan Induksi Lilitan



Gambar 13.9 Total ggl Et dari Tiga ggl Sinusoidal

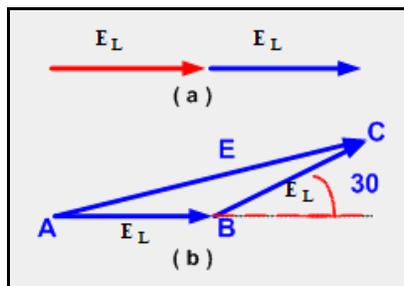


Gambar 13.10 Kisar Kumparan

- Menghemat tembaga yang digunakan.
- Memperbaiki bentuk gelombang dari tegangan yang dibangkitkan.
- Kerugian arus pusar dan Hysterisis dikurangi.

$$\text{Faktor.Kisar} = \frac{\text{Jumlah Vektor ggl induksi lili tan}}{\text{Jumlah Aljabar ggl induksi lili tan}} = K_p$$

EL ggl yang diinduksikan pada masing-masing lilitan, bila lilitan merupakan kisar penuh, maka total induksi = 2 EL (**gambar 13.11**).



Gambar 13.11 Vektor Tegangan Lilitan

Sedangkan kisar pendek dengan sudut 30 derajat listrik, seperti diperlihatkan pada **gambar 13.8b**, maka tegangan resultannya adalah :

$$E = 2 EL \cdot \cos 30/2$$

$$K_p = \frac{E}{2 \cdot EL} = \frac{2 \cdot EL \cdot \cos 30/2}{2 \cdot EL} = \cos 15^\circ$$

## Generator Sinkron

$$\begin{aligned}\text{Atau } K_p &= \cos \frac{30}{2} = \cos \frac{\alpha}{2} \\ &= \sin \frac{p^0}{2}\end{aligned}$$

dimana  $p^0$  adalah kisar kumparan dalam derajat listrik.

### 13.2.8. Gaya Gerak Listrik Kumparan

Pada Sub bab sebelumnya telah dibahas mengenai frekuensi dan besarnya tegangan masing-masing Phasa secara umum. Untuk lebih mendekati nilai ggl sebenarnya yang terjadi maka harus diperhatikan faktor distribusi dan faktor kisar.

Apabila  $Z$  = Jumlah penghantar atau sisi lilitan dalam seri/Phasa =  $2 T$

$T$  = Jumlah lilitan per Phasa

$$d\phi = \phi P \quad \text{dan} \quad dt = \frac{60}{N} \text{ detik}$$

Ggl induksi rata-rata per penghantar :

$$E_r = \frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi P}{60/N} = \frac{\phi \cdot N \cdot P}{60} \text{ Volt}$$

Sedangkan  $f = \frac{P \cdot N}{120}$ , atau  $N = \frac{120f}{P}$

Sehingga Ggl induksi rata-rata per penghantar menjadi :

$$E_r = \frac{\phi \cdot P}{60} \times \frac{120f}{P} = 2 \cdot f \cdot \phi \text{ Volt}$$

bila ada  $Z$  penghantar dalam seri/Phasa, maka : Ggl rata-rata/Phasa

$$= 2 \cdot f \cdot \phi \cdot Z \text{ Volt}$$

$$= 2 \cdot f \cdot \phi \cdot (2T) = 4 \cdot f \cdot \phi \cdot T \text{ volt}$$

Ggl efektif/Phasa =  $1,11 \times 4 \cdot f \cdot \phi \cdot T$

$$= 4,44 \times f \cdot \phi \cdot T \text{ Volt}$$

bila faktor distribusi dan faktor kisar dimasukkan, maka Ggl efektif/Phasa

$$E = 4,44 \cdot K_d \cdot K_p \cdot f \cdot \phi \cdot T \text{ Volt}$$

### 13.3. Prinsip Kerja Generator Sinkron

Kecepatan rotor dan frekuensi dari tegangan yang dibangkitkan berbanding secara langsung. Gambar 13.22 memperlihatkan prinsip kerja dari sebuah generator AC dengan dua kutub, dan dimisalkan hanya memiliki satu lilitan yang terbuat dari dua penghantar secara seri, yaitu penghantar  $a$  dan  $a'$ .

Lilitan seperti ini disebut “*Lilitan terpusat*”, dalam generator sebenarnya terdiri dari banyak lilitan dalam masing-masing Phasa yang terdistribusi pada masing-masing alur stator dan disebut “*Lilitan terdistribusi*”.

Diasumsikan rotor berputar searah jarum jam, maka flux medan rotor bergerak sesuai lilitan jangkar. Satu putaran rotor dalam satu detik menghasilkan satu siklus per detik atau 1 Hertz (Hz). Bila kecepatannya 60 Revolution per menit (Rpm), frekuensi 1 Hz. Untuk frekuensi  $f = 60$  Hz, maka rotor harus berputar 3600 Rpm.

Untuk kecepatan rotor  $n$  rpm, rotor harus berputar pada kecepatan  $n/60$  revolution per detik (rps). bila rotor mempunyai lebih dari 1 pasang kutub, misalnya  $P$  kutub maka masing-masing revolution dari rotor menginduksikan  $P/2$  siklus tegangan dalam lilitan stator.

Frekuensi dari tegangan induksi sebagai sebuah fungsi dari kecepatan rotor ,

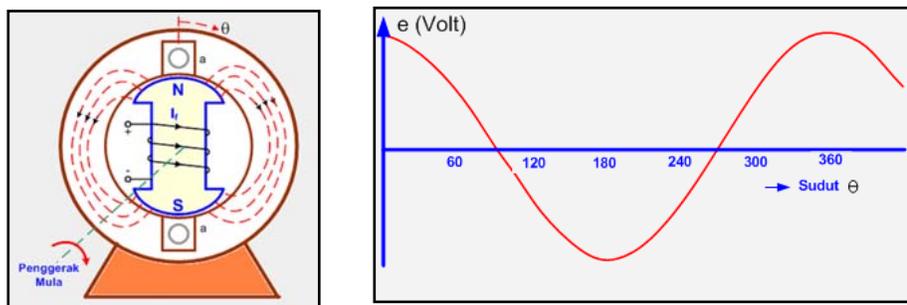
$$f = \frac{P}{2} \cdot \frac{n}{60} \text{ Hertz}$$

Untuk generator Sinkron tiga Phasa, harus ada tiga belitan yang masing-masing terpisah sebesar 120 derajat listrik dalam ruang sekitar keliling celah udara seperti diperlihatkan pada kumparan  $a - a'$ ,  $b - b'$  dan  $c - c'$  pada gambar 13.13.

Masing-masing lilitan akan menghasilkan gelombang Fluksi sinus satu dengan lainnya berbeda 120 derajat listrik. Dalam keadaan seimbang besarnya fluksi sesaat :

$$\begin{aligned} \Phi_A &= \Phi_m \cdot \sin \omega_t \\ \Phi_B &= \Phi_m \cdot \sin (\omega_t - 120^\circ) \\ \Phi_C &= \Phi_m \cdot \sin (\omega_t - 240^\circ) \end{aligned}$$

Besarnya fluks resultan adalah jumlah vektor ketiga fluks tersebut  $\Phi_T = \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C$ , yang merupakan fungsi tempat ( $\Phi$ ) dan waktu ( $t$ ), maka besar-



Gambar 13.12

Diagram Generator AC Satu Phasa Dua Kutub.

## Generator Sinkron

besarnya fluks total adalah,  $\Phi_T = \Phi_m \cdot \sin \omega_t + \Phi_m \cdot \sin(\omega_t - 120^\circ) + \Phi_m \cdot \sin(\omega_t - 240^\circ) \cdot \cos(\varphi - 240^\circ)$

Dengan memakai transformasi trigonometri dari :  $\sin \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} \cdot \sin(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \sin(\alpha - \beta)$ , maka dari persamaan 8-5 diperoleh :  $\Phi_T = \frac{1}{2} \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega_t + \varphi) + \frac{1}{2} \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega_t - \varphi) + \frac{1}{2} \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega_t + \varphi - 240^\circ) + \frac{1}{2} \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega_t - \varphi) + \frac{1}{2} \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega_t + \varphi - 480^\circ)$

Dari persamaan diatas, bila diuraikan maka suku kesatu, ketiga, dan kelima akan silang menghilangkan. Dengan demikian dari persamaan akan didapat fluksi total sebesar,  $\Phi_T = \frac{3}{4} \Phi_m \cdot \sin(\omega_t - \varphi)$  Weber .

Jadi medan resultan merupakan medan putar dengan modulus  $\frac{3}{2} \Phi$  dengan sudut putar sebesar  $\omega$ .

Besarnya tegangan masing-masing Phasa adalah :

$$E_{\text{maks}} = B_m \cdot l \cdot \omega \cdot r \quad \text{Volt}$$

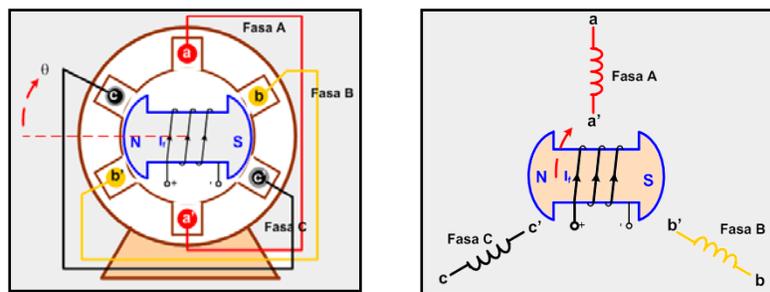
dimana :

$B_m$  = Kerapatan Flux maximum kumparan medan rotor (Tesla)

$l$  = Panjang masing-masing lilitan dalam medan magnetik (Weber)

$\omega$  = Kecep sudut dari rotor (rad/s)

$r$  = Radius dari jangkar (meter)



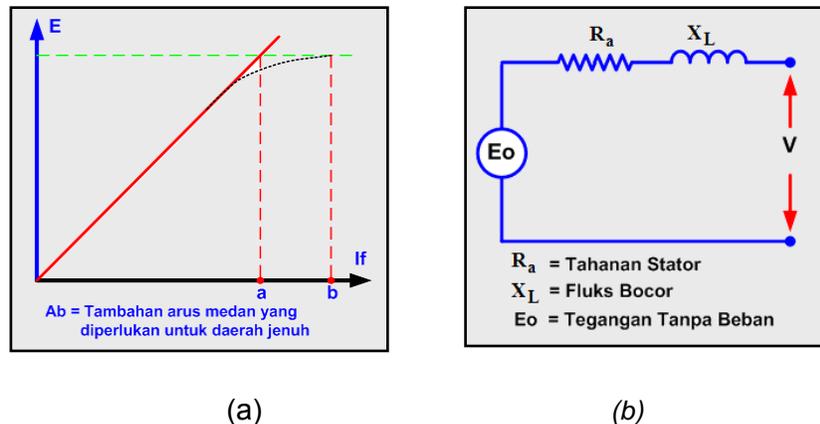
Gambar 13.13 Diagram Generator AC Tiga Phasa Dua Kutub

## 13.4 Generator Tanpa Beban

Apabila sebuah Mesin Sinkron difung-sikan sebagai generator dengan diputar pada kecepatan Sinkron dan rotor diberi arus medan ( $I_f$ ), maka pada kumparan jangkar stator akan diinduksikan tegangan tanpa beban ( $E_o$ ), yaitu :

$$E_o = 4,44 \cdot K_d \cdot K_p \cdot f \cdot \phi_m \cdot T \quad \text{Volt}$$

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, sehingga tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluk hanya dihasilkan oleh arus medan ( $I_f$ ). Bila besarnya arus medan dinaikkan, maka tegangan output juga akan naik sampai titik saturasi(jenuh) seperti diperlihatkan pada **gambar 13.14**. Kondisi Generator tanpa beban bisa digambarkan rangkaian ekuivalennya seperti diperlihatkan pada **gambar 13.14b**.



Gambar 13.14 Kurva dan Rangkaian Ekuivalen Generator Tanpa Beban

### 13.5. Generator Berbeban

Bila Generator diberi beban yang beru-bah-ubah maka besarnya tegangan terminal  $V$  akan berubah-ubah pula, hal ini disebabkan adanya kerugian tegangan pada:

- Resistansi jangkar  $R_a$
- Reaktansi bocor jangkar  $X_L$
- Reaksi Jangkar  $X_a$

#### a. Resistansi Jangkar

Resistansi jangkar/Phasa  $R_a$  menyebabkan terjadinya tegangan jatuh (Kerugian tegangan)/Phasa I.  $R_a$  yang sePhasa dengan arus jangkar.

#### b. Reaktansi Bocor Jangkar

Saat arus mengalir melalui penghantar jangkar, sebagian fluk yang terjadi tidak mengimbas pada jalur yang telah ditentukan, hal seperti ini disebut *Fluk Bocor*.

c. Reaksi Jangkar

Adanya arus yang mengalir pada kumparan jangkar saat Generator dibe-bani akan menimbulkan *fluksi jangkar* ( $\phi_A$ ) yang berintegrasi dengan fluksi yang dihasilkan pada kumparan medan rotor( $\phi_F$ ), sehingga akan dihasilkan suatu fluksi resultan sebesar :

$$\bar{\phi}_R = \bar{\phi}_F + \bar{\phi}_A$$

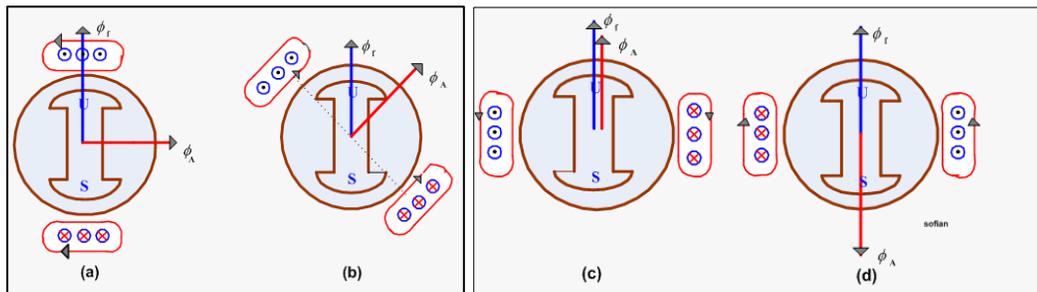
Interaksi antara kedua fluksi ini disebut sebagai *reaksi jangkar*, seperti diperlihatkan pada Gambar 13.15. yang mengilustrasikan kondisi reaksi jangkar untuk jenis beban yang berbeda-beda.

**Gambar 13.15a** , memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat generator dibebani tahanan (resistif) sehingga arus jangkar Ia sePhasa dengan ggl Eb dan  $\phi_A$  akan tegak lurus terhadap  $\phi_F$ .

**Gambar 13.15b**, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat generator dibebani kapasitif , sehingga arus jangkar Ia mendahului ggl Eb sebesar  $\theta$  dan  $\phi_A$  terbelakang terhadap  $\phi_F$  dengan sudut  $(90 -\theta)$ .

**Gambar 13.15c**, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat dibebani kapasitif murni yang mengakibatkan arus jangkar Ia mendahului ggl Eb sebesar  $90^\circ$  dan  $\phi_A$  akan memperkuat  $\phi_F$  yang berpengaruh terhadap pemagnetan.

**Gambar 13.15d**, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat arus diberi beban induktif murni sehingga mengakibatkan arus jangkar Ia terbelakang dari ggl Eb sebesar  $90^\circ$  dan  $\phi_A$  akan memper-lemah  $\phi_F$  yang berpengaruh terhadap pemagnetan.



Gambar 13.15 Kondisi Reaksi Jangkar

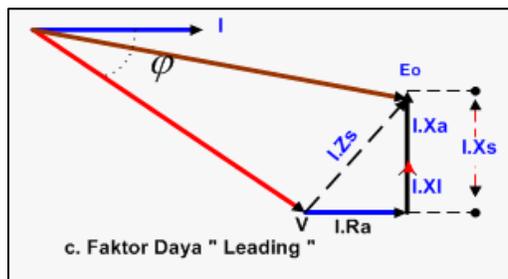
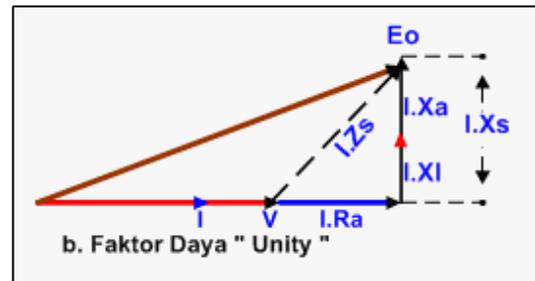
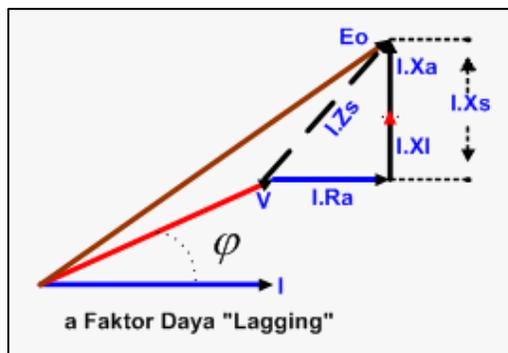
Jumlah dari reaktansi bocor  $X_L$  dan reaktansi jangkar  $X_a$  biasa disebut reaktansi Sinkron  $X_s$ .

Vektor diagram untuk beban yang bersifat Induktif, resistif murni, dan kapasitif diper- lihatkan pada Gambar 12 .16

Berdasarkan gambar diatas, maka bisa ditentukan besarnya tegangan jatuh yang terjadi, yaitu :

**Total Tegangan Jatuh pada Beban :**

$$\begin{aligned}
 &= I.R_a + j(I.X_a + I.X_L) \\
 &= I\{R_a + j(X_a + X_L)\} \\
 &= I\{R_a + j(X_s)\} = I.Z_s
 \end{aligned}$$



Gambar 13.16 Vektor Diagram dari Beban Generator

### 13.6 Menentukan Resistansi dan Reaktansi

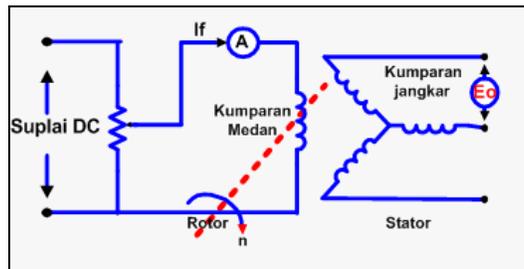
Untuk bisa menentukan nilai reaktansi dan impedansi dari sebuah generator, harus dilakukan percobaan(test). Ada tiga jenis test yang biasa dilakukan, yaitu :

## Generator Sinkron

- Test Tanpa beban ( Beban Nol )
- Test Hubung Singkat.
- Test Resistansi Jangkar.

### 13.6.1. Test Tanpa Beban

Test Tanpa Beban dilakukan pada kecepatan Sinkron dengan rangkaian jangkar terbuka (tanpa beban) seperti diperlihatkan pada Gambar 13.17 perco-baan dilakukan dengan cara mengatur arus medan ( $I_f$ ) dari nol sampai rating tegangan output terminal tercapai.

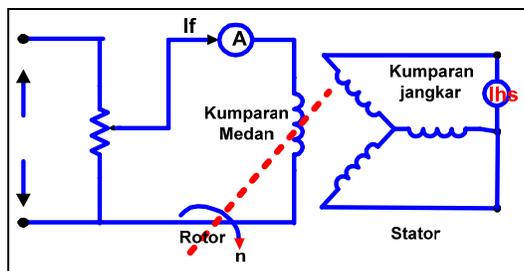


Gambar 13.17 Rangkaian Test Generator Tanpa Beban.

### 13.6.2. Test Hubung Singkat

Untuk melakukan test ini terminal alternator dihubung singkat dengan Amperemeter diletakkan diantara dua penghantar yang dihubung singkat tersebut Gambar 13.18. Arus medan dinaikkan secara bertahap sampai diperoleh arus jangkar maksimum. Selama proses test arus  $I_f$  dan arus hubung singkat  $I_{hs}$  dicatat.

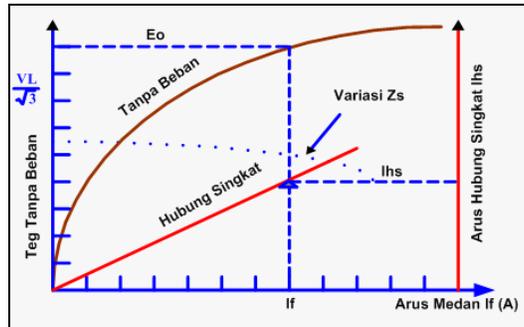
Dari hasil kedua test diatas, maka dapat digambar bentuk karakteristik seperti diperlihatkan pada **gambar 13.18**



Gambar 13.18 Rangkaian Test Generator di Hubung Singkat

Impedansi Sinkron dicari berdasarkan hasil test, adalah :

$$Z_s = \frac{E_o}{I_{hs}} \Big|_{I_f = \text{konstan}} \dots \text{Ohm}$$

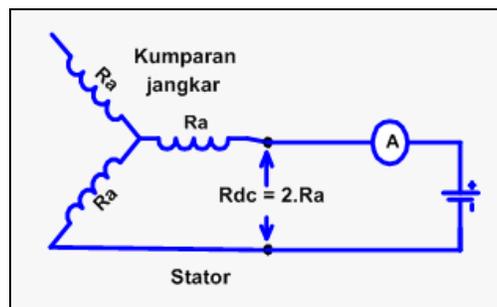


Gambar 13.19 Karakteristik Tanpa Beban dan Hubung Singkat sebuah Generator

### 13.6.3. Test Resistansi Jangkar

Dengan rangkaian medan terbuka, resistansi DC diukur antara dua terminal output sehingga dua Phasa terhubung secara seri Gambar 13.20. Resistansi per Phasa adalah setengahnya dari yang diukur. Dalam kenyataannya nilai resistansi dikalikan dengan suatu *faktor* untuk menentukan nilai resistansi AC efektif,  $R_{eff}$ . Faktor ini tergantung pada bentuk dan ukuran alur, ukuran penghantar jangkar, dan konstruksi kumparan. Nilainya berkisar antara **1,2 s/d 1,6**. Bila nilai  $R_a$  telah diketahui, nilai  $X_s$  bisa ditentukan berdasarkan persamaan :

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2} \text{ Ohm}$$



Gambar 13.20 Pengukuran Resistansi DC

### 13.7. Pengaturan Tegangan

Pengaturan tegangan adalah *perubahan tegangan terminal antara keadaan beban nol dengan beban penuh*, dan ini dinyatakan dengan persamaan :

$$\% \text{ Pengaturan Tegangan} = \frac{E_o - V}{V} \times 100$$

Terjadinya perbedaan tegangan terminal  $V$  dalam keadaan berbeban dengan tegangan  $E_o$  pada saat tidak berbeban dipengaruhi oleh faktor daya dan besar-nya arus jangkar ( $I_a$ ) yang mengalir.

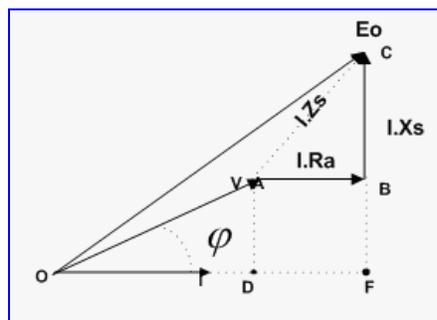
Untuk menentukan pengaturan tegangan dari generator adalah dengan memanfaatkan karakteristik tanpa beban dan hubung singkat yang diperoleh dari hasil percobaan dan pengukuran tahanan jangkar. Ada tiga metoda atau cara yang sering digunakan untuk menentukan pengaturan tegangan tersebut, yaitu :

- Metoda Impedansi Sinkron atau Metoda GGL.
- Metoda Amper Lilit atau Metoda GGM.
- Metoda Faktor Daya Nol atau Metoda Potier.

#### 13.7.1. Metoda Impedansi Sinkron

Untuk menentukan pengaturan tegangan dengan menggunakan Metoda Impedansi Sinkron, langkah-langkahnya sebagai berikut :

- Tentukan nilai impedansi Sinkron dari karakteristik tanpa beban dan karakteristik hubung singkat.
- Tentukan nilai  $R_a$  berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan.
- Berdasarkan persamaan hitung nilai  $X_s$
- Hitung harga tegangan tanpa beban  $E_o$
- Hitung prosentase pengaturan tegangan.



Gambar 13.21 Vektor Diagram Pf "Lagging"

**Gambar 13.21** memperlihatkan contoh Vektor diagram untuk beban dengan faktor daya lagging.  $E_o = OC$  = Tegangan tanpa beban

$V = OA$  = Tegangan terminal

$I.R_a = AB$  = Tegangan jatuh Resistansi Jangkar

$I.X_s = BC$  = Tegangan jatuh Reaktansi Sin-kron.

$$OC = \sqrt{OF^2 + FC^2}$$

$$OC = \sqrt{(OD + DF)^2 + (FB + BC)^2}$$

atau

$$E_o = \sqrt{(V \cos \phi + I.R_a)^2 + (V \sin \phi + I.X_s)^2}$$

$$\% \text{Pengaturan} = \frac{E_o - V}{V} \times 100$$

Pengaturan yang diperoleh dengan metoda ini biasanya lebih besar dari nilai sebenarnya.

### 13.7.2. Metoda Amper Lilit

Perhitungan dengan Metoda Amper Lilit berdasarkan data yang diperoleh dari percobaan tanpa beban dan hubung singkat. Dengan metoda ini reaktansi bocor  $X_l$  diabaikan dan reaksi jangkar diperhitungkan. Adapun langkah-langkah menentukan nilai arus medan yang diperlukan untuk memperoleh tegangan terminal generator saat diberi beban penuh, adalah sebagai berikut :

- Tentukan nilai arus medan (Vektor OA) dari percobaan beban nol yang diperlukan untuk mendapatkan tegangan nominal generator.
- Tentukan nilai arus medan (Vektor AB) dari percobaan hubung singkat yang diperlukan untuk mendapatkan arus beban penuh generator.
- Gambarkan diagram vektornya dengan memperhatikan faktor dayanya :
  - untuk faktor daya “Lagging” dengan sudut  $(90^\circ + \phi)$
  - untuk faktor daya “Leading” dengan sudut  $(90^\circ - \phi)$
  - untuk faktor daya “Unity” dengan sudut  $(90^\circ)$  perhatikan **gambar 13.22 a, b, dan c)**
- Hitung nilai arus medan total yang ditunjukkan oleh vektor OB.

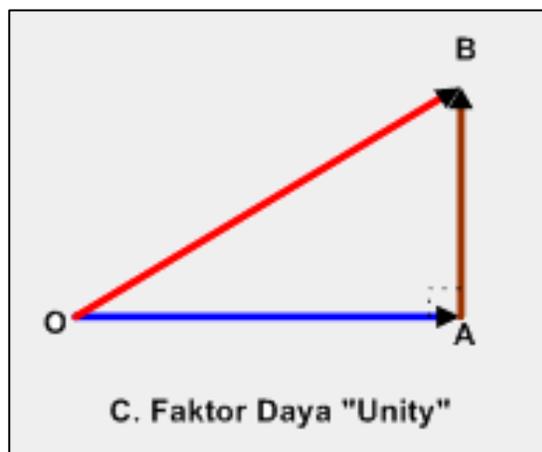
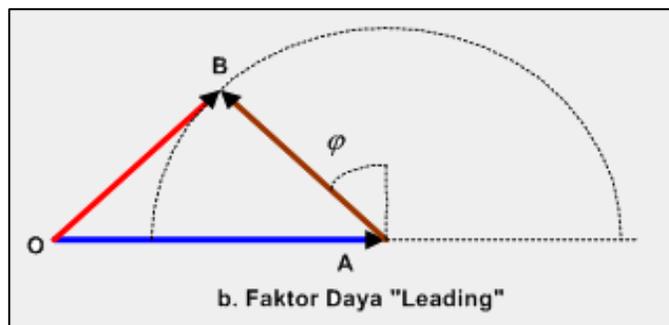
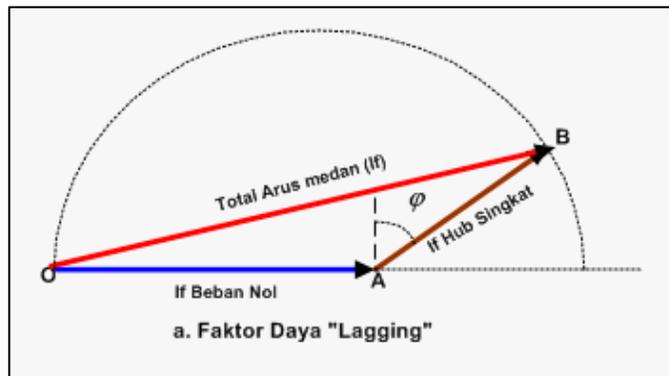
**Gambar 5.23** memperlihatkan diagram secara lengkap dengan karakteristik beban nol dan hubung singkat.

OA = Arus medan yang diperlukan untuk mendapatkan tegangan nominal.

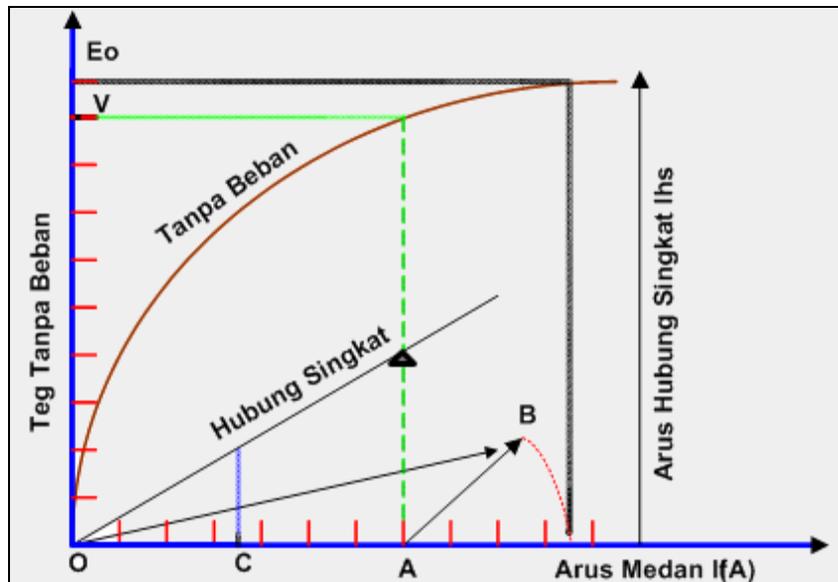
OC = Arus medan yang diperlukan untuk mendapatkan arus beban penuh pada hubung singkat.

AB = OC = dengan sudut  $(90^\circ + \phi)$  terhadap OA.

## Generator Sinkron



Gambar 13.22 Vektor Arus Medan



Gambar 13.23 Karakteristik Beban Nol, Hubung Singkat, dan Vektor Arus Medan.

OB = Total arus medan yang dibutuhkan untuk mendapatkan tegangan E<sub>0</sub> dari karakteristik beban nol.

$$OB = \sqrt{OA^2 + AB^2 + 2 \times OA \times AB \times \cos\{180 - (90^\circ + \phi)\}}$$

### 17.7.3. Metoda Potier

Metoda ini berdasarkan pada pemisahan kerugian akibat reaktansi bocor X<sub>l</sub> dan pengaruh reaksi jangkar X<sub>a</sub>. Data yang diperlukan adalah :

- Karakteristik Tanpa beban.
- Karakteristik Beban penuh dengan faktor daya nol.

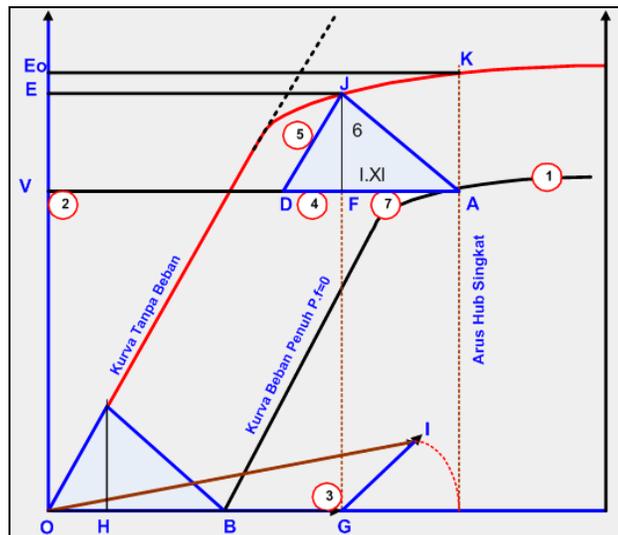
Khusus untuk karakteristik beban penuh dengan faktor daya nol dapat diperoleh dengan cara melakukan percobaan terhadap generator seperti halnya pada saat percobaan tanpa beban, yaitu menaikkan arus medan secara bertahap, yang membedakannya supaya menghasilkan faktor daya nol, maka generator harus diberi beban reaktor murni. Arus jangkar dan faktor daya nol saat di-bebani harus dijaga konstan.

Langkah-langkah untuk menggambar Diagram Potier sebagai berikut :

1. Pada kecepatan Sinkron dengan beban reaktor, atur arus medan sampai tegangan nominal dan beban reaktor (arus beban) sampai arus nominal

## Generator Sinkron

- Gambarkan garis sejajar melalui kurva beban nol. Buat titik **A** yang menunjukkan nilai arus medan pada percobaan faktor daya nol pada saat tegangan nominal.
- Buat titik **B**, berdasarkan percobaan hubung singkat dengan arus jangkar penuh. **OB** menunjukkan nilai arus medan saat percobaan tersebut.
- Tarik garis **AD** yang sama dan sejajar garis **OB**.
- Melalui titik **D** tarik garis sejajar kurva senjang udara sampai memotong kurva beban nol dititik **J**. **Segitiga ADJ dise-but segitiga Potier**.
- Gambar garis **JF** tegak lurus **AD**. Panjang **JF** menunjukkan kerugian tegangan akibat reaktansi bocor.
- AF** menunjukkan besarnya arus medan yang dibutuhkan untuk mengatasi efek magnetisasi akibat reaksi jangkar saat beban penuh.
- DF** untuk menyeimbang reaktansi bocor jangkar (**JF**)



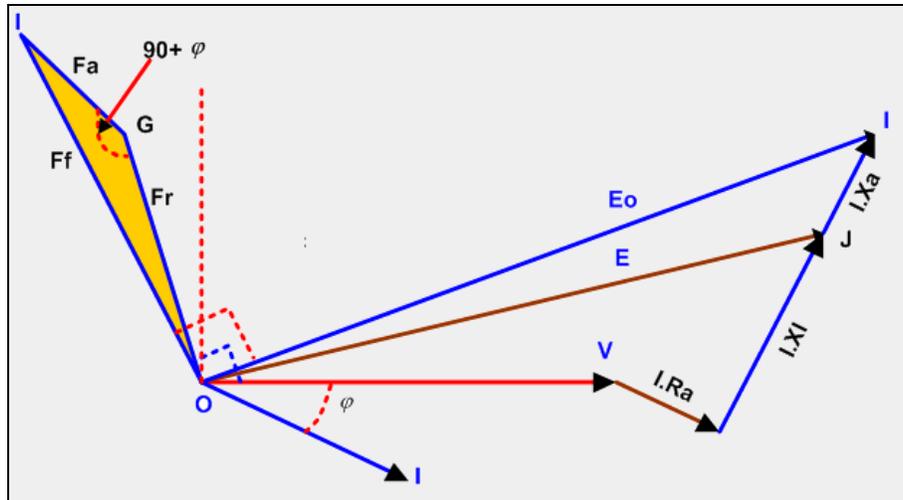
Gambar 13.24 Diagram Potier

Dari gambar Diagram Potier diatas, bisa dilihat bahwa :

- **V** nilai **tegangan terminal** saat beban penuh.
- V ditambah JF ( $I \cdot X_l$ ) menghasilkan **tegangan E**.
- **BH = AF** = arus medan yang dibutuhkan untuk mengatasi reaksi jangkar.
- Bila vektor BH ditambah kan ke OG, maka besarnya arus medan yang dibutuhkan untuk **tegangan tanpa beban Eo** bisa diketahui.

Vektor diagram yang terlihat pada diagram Potier bisa digambarkan secara terpisah seperti terlihat pada Gambar 13.25.

$$\% \text{ Pengaturan Tegangan} = \frac{E_o - V}{V} \times 100$$



Gambar 13.25 Vektor Diagram Potier

### 13.8. Keria Paralel Generator

Bila suatu generator mendapat pembebanan lebih dari kapasitasnya bisa mengakibatkan generator tidak bekerja atau rusak. Untuk mengatasi beban yang terus meningkat tersebut bisa diatasi dengan menjalankan generator lain yang kemudian dioperasikan secara paralel dengan generator yang telah bekerja sebelumnya.

Keuntungan lain, bila salah satu generator tiba-tiba mengalami gangguan, generator tersebut dapat dihentikan serta beban dialihkan pada generator lain, sehingga pemutusan listrik secara total bisa dihindari.

#### 13.8.1. Cara Memparalel Generator

Syarat-syarat yang harus dipenuhi untuk memparalel dua buah generator atau lebih ialah :

- Polarisasi dari generator harus sama dan bertentangan setiap saat terhadap satu sama lainnya.
- Nilai efektif arus bolak-balik dari tegangan harus sama.
- Tegangan Generator yang diparalelkan mempunyai bentuk gelombang yang sama.
- Frekuensi kedua generator atau frekuensi generator dengan jala-jala harus sama.
- Urutan fasa dari kedua generator harus sama.

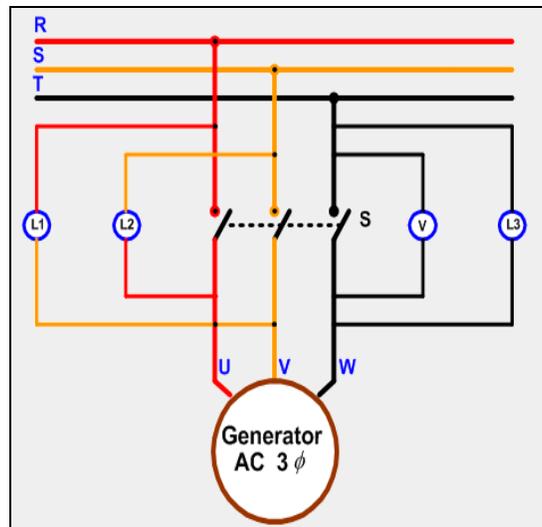
## Generator Sinkron

Ada beberapa cara untuk memparalelkan generator dengan mengacu pada syarat-syarat diatas, yaitu :

- Lampu Cahaya berputar dan Volt-meter
- Voltmeter, Frekuensi Meter, dan Synchroscope.
- Cara Otomatis

### 13.8.2. Lampu Cahaya Berputar dan Volt-meter

Dengan rangkaian pada ***gambar 13.26***, pilih lampu dengan tegangan kerja dua kali tegangan phasa netral generator atau gunakan dua lampu yang dihubungkan secara seri. Dalam keadaan saklar S terbuka operasikan generator, kemudian lihat urutan nyala lampu. Urutan lampu akan berubah menurut urutan L1 - L2 - L3 - L1 - L2 - L3.



Gambar 13.26 Rangkaian Paralel Generator

Perhatikan Gambar 13.27a, pada keadaan ini L1 paling terang, L2 terang, dan L3 redup.

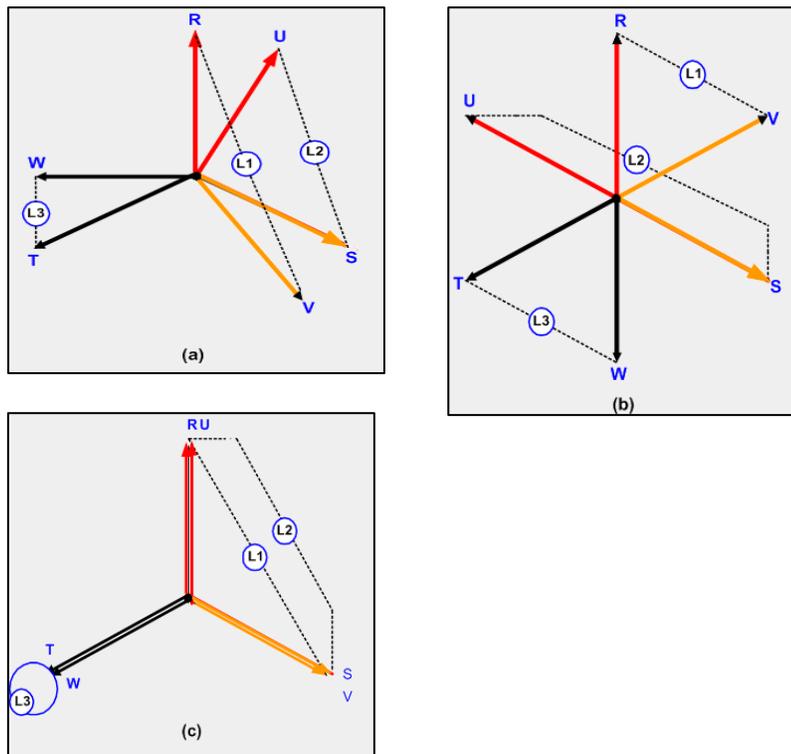
Perhatikan Gambar 13.27b, pada keadaan ini:

- L2 paling terang
- L1 terang
- L3 terang

Perhatikan gambar 13.27c, pada keadaan ini,

- L1 dan L2 sama terang
- L3 Gelap dan Voltmeter=0 V

Pada saat kondisi ini maka generator dapat diparalelkan dengan jala-jala (generator lain).



Gambar 13.27 Rangkaian Lampu Berputar

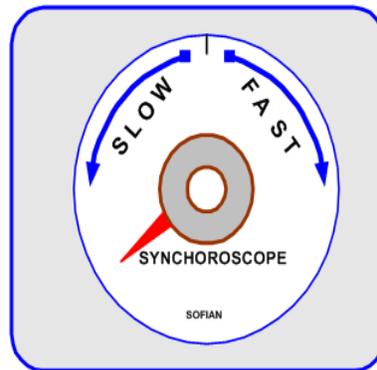
### 13.8.3. Voltmeter, Frekuensi Meter dan Synchroscope

Pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik, untuk indikator paralel generator banyak yang menggunakan alat **Synchroscope** gambar 13.28. Penggunaan alat ini dilengkapi dengan Voltmeter untuk memonitor kesamaan tegangan dan Frekuensi meter untuk kesamaan frekuensi.

Ketepatan sudut fasa dapat dilihat dari synchroscope. Bila jarum penunjuk ber-putar berlawanan arah jarum jam berarti frekuensi generator lebih rendah dan bila searah jarum jam berarti frekuensi generator lebih tinggi. Pada saat jarum telah diam dan menunjuk pada kedudukan vertikal, berarti beda fasa generator dan jala-jala telah 0 (Nol) dan selisih frekuensi telah 0 (Nol), maka pada kondisi ini saklar dimasukkan (ON). Alat synchroscope tidak bisa menunjukkan urutan fasa jala-jala, sehingga untuk memparalelkan perlu dipakai indikator urutan fasa jala-jala.

### 13.9. Paralel Otomatis

Paralel generator secara otomatis biasanya menggunakan alat yang secara otomatis memonitor perbedaan fasa, tegangan, frekuensi, dan urutan fasa. Apabila semua kondisi telah tercapai alat memberi suatu sinyal bahwa saklar untuk paralel dapat dimasukkan.



Gambar 13. 28 Sychroscope

### 13.10. Rangkuman

- Mesin Sinkron bisa dioperasikan baik sebagai generator maupun motor.
- Generator Sinkron Tiga Fasa memiliki dua jenis eksitasi a) dengan penguatan generator DC "Pilot Exciter. b) penguatan brushless.
- Bentuk rotor Mesin Sinkron berkecepatan tinggi seperti turbo generator mempunyai bentuk silinder, sedangkan Mesin dengan kecepatan rendah seperti hydroelectric mempunyai rotor kutub menonjol.
- Stator dari Mesin Sinkron terbuat dari bahan ferromagnetik, belitan stator berupa belitan satu lapis atau belitan lapis anda.
- Belitan stator satu lapis karena hanya ada satu sisi lilitan didalam masing-masing alur.
- Pada masing-masing alur ada dua sisi lilitan dan masing-masing lilitan memiliki lebih dari satu putaran.
- Pada belitan stator mengandung faktor distribusi dan faktor kisar belitan yang besarnya lebih kecil dari satu.
- Tegangan efektif per fasa bila faktor distribusi dan faktor kisar dimasukkan, berlaku rumus.  $E = 4,44 \cdot K_d \cdot K_p \cdot f \cdot \phi \cdot T$  Volt

- Frekuensi dari tegangan induksi sebagai sebuah fungsi dari kecepatan rotor,  
$$f = \frac{P}{2} \frac{n}{60} \text{ Hertz.}$$
- Mesin Sinkron difungsikan sebagai generator, rotor diputar pada kecepatan Sinkron dan belitan medan rotor diberi arus medan ( $I_f$ ), maka pada kumparan stator akan diinduksikan tegangan.
- Ada perbedaan karakteristik saat generator tanpa beban dan generator berbeban.
- Saat generator berbeban mengalir arus pada jangkar, maka besarnya tegangan terminal  $V$  akan berubah-ubah, hal ini disebabkan adanya kerugian tegangan pada: resistansi jangkar  $R_a$ ; reaktansi bocor jangkar; reaksi Jangkar.
- Pengukuran resistansi dan impedansi generator dilakukan tiga jenis test yang bisa dilakukan, yaitu : test tanpa beban; test hubung singkat. test resistansi jangkar.
- Pengaturan tegangan adalah perubahan tegangan terminal antara keadaan beban nol dengan beban penuh.
- Ada tiga metoda yang digunakan untuk menentukan pengaturan tegangan yaitu : metoda Impedansi Sinkron atau Metoda GGL, metoda Amper Lilit atau Metoda GGM, metoda Faktor Daya Nol (Potier).
- Syarat untuk paralel dua generator Sinkron meliputi : a) Polaritas dari generator harus sama b) nilai efektif arus bolak-balik dari tegangan harus sama, c) tegangan generator sama. d) frekuensi sama. e) urutan fasa dari kedua generator harus sama.
- Teknik paralel generator menggunakan : a) Lampu Cahaya berputar dan Volt-meter; b) Voltmeter, Frekuensi Meter, dan Synchroscope; c) Cara Otomatis

### 13.11. Soal-soal

1. Sebuah generator Sinkron mempunyai 8 kutub. Berapa sudut mekanis ditunjukkan dengan 180 derajat listrik.
2. Generator Sinkron memiliki data name plate 3 fasa, 2 HP, 50 Hz, 400 V. 4 kutub. Hitungkan putaran Sinkron permenit.
3. Generator Sinkron memiliki 24 alur, 4 kutub, 3 fasa, akan di rewinding. Buatlah gambar wiring yang lengkap dan jelas, bedakan warna dari masing-masing fasa.

## **Generator Sinkron**

---

4. Generator 2KW, 220V/50Hz digerakkan dengan mesin diesel, listrik yang dihasilkan dipakai untuk memberikan listrik untuk sejumlah rumah. Bagaimana cara agar generator tersebut menghasilkan tegangan 220V dan frekuensinya 50Hz.
5. Generator Sinkron akan dilakukan paralel dengan jala-jala PLN 3x 380V, 50 Hz. Buatlah gambar skematik paralel generator dengan jala-jala PLN lengkap dengan peralatan ukur yang diperlukan. Jelaskan langkah paralel generator dan parameter yang harus dipenuhi.

## **BAB 14**

### **SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK**

**Daftar Isi :**

14.1. Penggunaan Energi .....	14-2
14.2. Sejarah Penyediaan Tenaga Listrik .....	14-2
14.3. Peranan Tenaga Listrik .....	14-3
14.4. Instalasi Penyediaan dan Pemanfaatan Tenaga Listrik .....	14-5
14.5. Jaringan Listrik .....	14-9
14.6. Alat Pengukur dan Pembatas (APP) .....	14-18
14.7. Panel Hubung Bagi (PHB) .....	14-20
14.8. Penghantar .....	14-26
14.9. Beban Listrik .....	14-27
14.10. Rangkuman .....	14-31
14.11. Soal-soal .....	14-32

### 14.1. Penggunaan Energi

Sejak awal kehidupan di dunia ini, untuk mencukupi kebutuhan, manusia sudah memerlukan energi alam. Sejak jaman prasejarah sumber energi alam, seperti kayu dipakai memanaskan badan, memasak dan pertukangan. Awal abad 12, bentuk energi lainnya seperti angin dan air dimanfaatkan untuk keperluan pengangkutan dan penggilingan biji-bijian. Manusia mulai memanfaatkan energi batubara untuk keperluan pemanasan dan memasak pada awal abad ke 14. Sejak abad 18 di Inggris batubara ini digunakan untuk menghasilkan uap dan menggerakkan mesin uap pada pabrik pengerjaan logam dan tekstil.

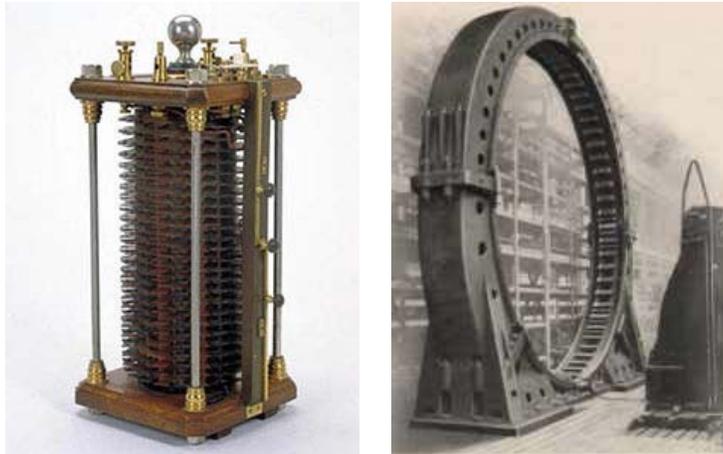
Berbagai penelitian dan uji coba dilakukan, sehingga dapat menemukan bentuk-bentuk energi alam lainnya yang dapat dimanfaatkan dalam kebutuhan dan kegiatan sehari-hari. Sampai sekarang hasil penelitian menghasilkan beberapa sumber energi, diantaranya:

1. Energi Mekanik
2. Energi Medan Magnet
3. Energi Grafitasi
4. Energi Nuklir
5. Energi Sinar
6. Energi Panas
7. Energi Listrik

Semua zat-zat (padat, cair dan gas) yang ada di alam semesta ini disebut materi. Materi ini mengandung energi dan energi ini dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya, karena alam maupun kejadian-kejadian teknis. Menurut hukum kekekalan energi bahwa energi itu tidak dapat diciptakan ataupun dimusnahkan, tetapi dapat berubah dari energi satu ke energi lainnya.

### 14.2. Sejarah Penyediaan Tenaga Listrik

Pada tahun 1885 seorang dari Perancis bernama *Lucian Gauland* dan *John Gibbs* dari Inggris menjual hak patent generator arus bolak-balik kepada seorang pengusaha bernama *George Westinghouse* **gambar 14.1**. Selanjutnya dikembangkan generator arus bolak-balik dengan tegangan tetap, pembuatan transformator dan akhirnya diperoleh sistem jaringan arus bolak-balik sebagai transmisi dari pembangkit ke beban/pemakai.



a. Generator Gaulard dan Gibbs    b. Generator Westinghouse  
Gambar 14.1 Generator

Sejarah kelistrikan di Indonesia dimulai dengan selesai dibangunnya pusat tenaga listrik di Gambir, Jakarta Mei 1887, kemudian di Medan (1899), Surakarta (1902), Bandung (1906), Surabaya (1912), dan Banjarmasin (1922). Pusat-pusat tenaga listrik ini pada awalnya menggunakan tenaga thermis. Kemudian disusul dengan pembuatan pusat-pusat listrik tenaga air : PLTA Giringan di Madiun (1917), PLTA Tes di Bengkulu (1920), PLTA Plengan di Priangan (1922), PLTA Bengkok dan PLTA Dago di Bandung (1923).

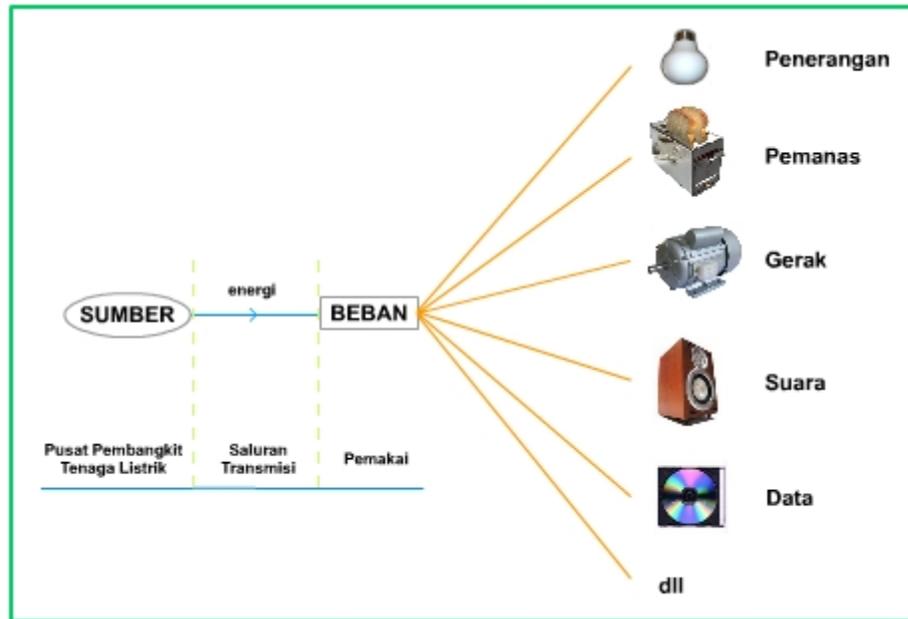
Sebelum kemerdekaan perusahaan tenaga listrik di Indonesia dikelola oleh beberapa perusahaan swasta, diantaranya yang terbesar adalah NIGEM (*Nederlands Indische Gas en Electriciteits Maatschappij*) yang kemudian menjelma menjadi OGEM (*Overzese Gas en Electriciteits Maatschappij*), ANIEM (*Algemene Nederlands Indische Electriciteits Maatschappij*), dan GEBEO (*Gemeen Schappelijk Electriciteits Bedrijf Bandung en Omsheken*). Sedangkan Jawatan Tenaga Air membangun dan mengusahakan sebagian besar pusat-pusat listrik tenaga air di Jawa Barat. Sejak tahun 1958 pengelolaan ketenaga listrikan di Indonesia oleh Perusahaan Umum Listrik Negara.

### 14.3. Peranan Tenaga Listrik

Di pusat pembangkit tenaga listrik, generator digerakan oleh turbin dari bentuk energi lainnya antara lain : dari Air - PLTA; Gas - PLTG; Uap - PLTU; ; Diesel - PLTD; Panas Bumi - PLTP; Nuklir - PLTN.

Energi listrik dari pusat pembangkitnya disalurkan melalui jaringan transmisi yang jaraknya relatif jauh ke pemakai listrik/konsumen.

## Sistem Distribusi Tenaga Listrik



Gambar 14.2 Penyaluran Energi Listrik dari Sumber ke Beban

Konsumen listrik di Indonesia dengan sumber dari PLN atau Perusahaan swasta lainnya dapat dibedakan sebagai berikut :

### 1. Konsumen Rumah Tangga

Masing-masing rumah dayanya antara 450VA s.d. 4400VA, secara umum menggunakan sistem 1 fasa dengan tegangan rendah 220V / 380V dan jumlahnya sangat banyak.

### 2. Penerangan Jalan Umum (PJU)

Pada kota-kota besar penerangan jalan umum ini sangat diperlukan oleh karena bebannya berupa lampu dengan masing-masing daya tiap lampu/tiang antara 50VA s.d. 250VA bergantung pada jenis jalan yang diterangi, maka sistem yang digunakan 1 fasa dengan tegangan rendah 220V / 380V.

### 3. Konsumen Pabrik

Jumlahnya tidak sebanyak konsumen rumah tangga, tetapi masing-masing pabrik dayanya dalam orde ratusan kVA. Penggunaannya untuk pabrik yang kecil masih menggunakan sistem 1 fasa tegangan rendah (220V/380V), untuk pabrik-pabrik skala besar menggunakan sistem 3 fasa dan saluran masuknya dengan jaringan tegangan menengah 20kV.

### 4. Konsumen Komersial

Yang dimaksud konsumen komersial antara lain stasiun, terminal, KRL (Kereta Rel Listrik), hotel-hotel berbintang, rumah sakit besar, kampus,

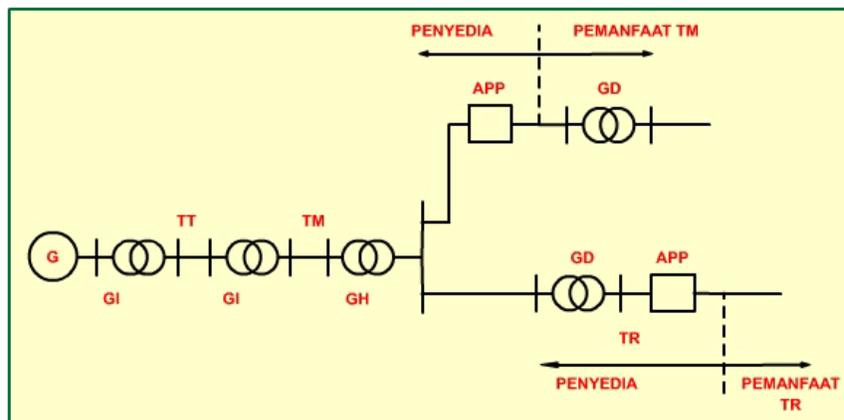
## Sistem Distribusi Tenaga Listrik

stadion olahraga, mall, supermarket, apartemen. Rata-rata menggunakan sistem 3 fasa, untuk yang kapasitasnya kecil dengan tegangan rendah, sedangkan yang berkapasitas besar dengan tegangan menengah 20KV.



Gambar 14.3 Distribusi Tenaga Listrik ke Konsumen

### 14.4. Instalasi Penyediaan dan Pemanfaatan Tenaga Listrik



Gambar 14.4 Instalasi Penyediaan dan Pemanfaatan Tenaga Listrik

Keterangan :

- G = Generator / Pembangkit Tenaga Listrik
- GI = Gardu Induk
- GH = Gardu Hubung
- GD = Gardu Distribusi
- TT = Jaringan Tegangan Tinggi
- TM = Jaringan Tegangan Menengah
- TR = Jaringan Tegangan Rendah
- APP = Alat Pembatas/Pengukur

Instalasi dari pembangkitan sampai dengan alat pembatas/pengukur (APP) disebut **Instalasi Penyediaan Tenaga Listrik**.

## Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Dari mulai APP sampai titik akhir beban disebut **Instalasi Pemanfaatan Tenaga Listrik**.

Standarisasi daya tersambung yang disediakan oleh pengusaha ketenagalistikan (PT. PLN) berupa daftar penyeragaman pembatasan dan pengukuran dengan daya tersedia untuk tarif S-2, S-3, R-1, R-2, R-4, U-1, U-2, G-1, I-1, I-2, I-3, H-1 dan H-2 pada jaringan distribusi tegangan rendah.

Sedangkan daya tersambung pada tegangan menengah, dengan pembatas untuk tarif S-4, SS-4, I-4, U-3, H-3 dan G-2 adalah sebagai tabel 14.1. berikut :

Tabel 14.1. Daya Tersambung pada Tegangan Menengah

Arus Nominal (Amper)	Daya Tersambung (kVA) pada Tegangan			
	6 kV	12 kV	15 kV	20 kV
-	*)	*)	*)	210**)
-	-	-	-	235***)
6,3	-	-	-	240
10	-	210	260	345
16	-	335	415	555
20	210	415	520	690
25	260	520	650	865
32	335	665	830	1.110
40	415	830	1.040	1.385
50	520	1.040	1.300	1.730
63	655	1.310	1.635	2.180
80	830	1.660	2.080	2.770
100	1.040	2.880	2.600	3.465
125	1.300	2.600	3.250	4.330
160	1.660	3.325	4.155	5.540
200	2.080	4.155	5.195	6.930
250	2.600	5.195	6.495	8.660

Keterangan :

\*) Secara bertahap disesuaikan menjadi 20 kV

\*\*\*) Pengukuran tegangan menengah tetapi dengan pembatasan pada sisi tegangan rendah dengan pembatas arus 3 x 355 Amper tegangan 220/380 Volt.

\*\*\*) Pengukuran tegangan menengah tetapi dengan pembatasan pada sisi tegangan rendah dengan pembatas arus 3 x 630 Amper tegangan 127/220 Volt.

## Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Pengguna listrik yang dilayani oleh PT. PLN dapat dibedakan menjadi beberapa golongan yang ditunjukkan tabel 14.2. berikut ini :

Tabel 14.2. Daya Tersambung Fungsi Arus Primer.

Arus Primer (A)	Daya Tersambung (kVA)	Arus Primer (A)	Daya Tersambung (kVA)
6	210	67,5	2335
7	245	70	2425
8	275	75	2595
9	310	80	2770
10	345	82,5	2855
11	380	87,5	3030
12	415	90	3115
14	485	100	3465
15	520	105	3635
16	555	110	3805
17,5	605	112,5	3895
18	625	120	4150
20	690	122,5	4240
21	725	125	4330
22	760	135	4670
22,5	780	140	4845
24	830	150	5190
25	865	157,5	5450
27	935	160	5540
27,5	950	165	5710
28	970	175	6055
30	1040	180	6230
32	1110	192,5	6660
33	1140	200	6930
35	1210	210	7265
36	1245	220	7615
40	1385	225	7785
42	1455	240	8305
44	1525	250	8660
45	1560	270	9345
48	1660	275	9515
50	1730	280	9690
52,5	1815	300	10380
54	1870	315	10900
55	1905	330	11420
60	2075	350	12110
66	2285	385	13320

## Sistem Distribusi Tenaga Listrik

---

Daya yang disarankan untuk pelanggan TM 20 kV (Pengukuran pada sisi TM dengan relai sekunder)

Pelanggan TM 20KV yang dibatasi dengan pelabur TM, standarisasi dayanya seperti tabel 14.3. berikut :

Tabel 14.3. Daya Tersambung Fungsi Pelabur

Arus Nominal TM (Amper)	Daya Tersambung (kVA)
6,3	240
10	345
16	555
20	690
25	865
32	1.110
40	1.385
50	1.730
63	2.180
80	2.770
100	3.465
125	4.330
160	5.540
200	6.930
250	8.660

Pelanggan TM yang dibatasi dengan pelabur TR, standarisasi dayanya seperti tabel 14.4. berikut :

Tabel 14.4. Daya Tersambung Tiga Phasa

Arus Nominal TR (Amper)	Daya Tersambung (kVA)
3 x 355	233
3 x 425	279
3 x 500	329
3 x 630	414
3 x 800	526
3 x 1000	630

Pengguna listrik yang dilayani oleh PT. PLN dapat dibedakan menjadi beberapa golongan yang ditunjukkan pada tabel 3.5. berikut ini :

*Tabel 14.5. Golongan Pelanggan PLN*

No	Golongan Tarif	Penjelasan	Sistem Tegangan	Batas Daya
1.	S – 1	Pemakai sangat kecil	TR	s/d 200 VA
2.	S – 2	Badan sosial kecil	TR	250 VA s/d 2200VA
3.	S – 3	Badan sosial sedang	TR	2201 VA s/d 200 kVA
4.	S – 4	Badan sosial besar	TM	201 Kva KEATAS
5.	SS – 4	Badan sosial besar dikelola swasta untuk komersial	TM	201 Kva KEATAS
6.	R – 1	Rumah tangga kecil	TR	250 VA s/d 500 VA
7.	R – 2	Rumah tangga sedang	TR	501 VA s/d 2200 VA
8.	R – 3	Rumah tangga menengah	TR	2201 VA s/d 6600 VA
9.	R – 4	Rumah tangga besar	TR	6601 VA KEATAS
10.	U – 1	Usaha Kecil	TR	250 VA s/d 2200 VA
11.	U – 2	Usaha Sedang	TR	2201 VA s/d 200 kVA
12.	U – 3	Usaha Besar	TM	201 kVA keatas
14.	U – 4	Sambungan Sementara	TR	
14.	H – 1	Perhotelan Kecil	TR	250 VA s/d 99 kVA
15.	H – 2	Perhotelan Sedang	TR	100 kVA s/d 200 kVA
16.	H – 3	Perhotelan Besar	TM	201 kVA keatas
17.	I – 1	Industri Rumah Tangga	TR	450 VA s/d 2200 VA
18.	I – 2	Industri Kecil	TR	2201 VA s/d 13,9 kVA
19.	I – 3	Industri Sedang	TR	14 kVA s/d 200 kVA
20.	I – 4	Industri Menengah	TM	201 Kva KEATAS
21.	I – 5	Industri Besar	TT	30.000 kVA keatas
22.	G – 1	Gedung Pemerintahan kecil/sedang	TR	250 VA s/d 200 kVA
23.	G – 2	Gedung Pemerintahan Besar	TM	201 Kva KEATAS
24.	J	Penerangan Umum	TR	

### 14.5. Jaringan Listrik

Pusat tenaga listrik umumnya terletak jauh dari pusat bebannya. Energi listrik yang dihasilkan pusat pembangkitan disalurkan melalui jaringan transmisi. Tegangan generator pembangkit relatif rendah (6kV-24kV). Maka tegangan ini dinaikan dengan transformator daya ke tegangan yang lebih tinggi antara 150kV-500kV. Tujuan peningkatan tegangan ini, selain memperbesar daya hantar dari saluran (berbanding lurus dengan kwadrat tegangan), juga untuk memperkecil rugi daya dan susut tegangan pada saluran transmisi.

Penurunan tegangan dari jaringan tegangan tinggi /ekstra tinggi sebelum ke konsumen dilakukan dua kali. Yang pertama dilakukan di gardu induk

## Sistem Distribusi Tenaga Listrik

---

(GI), menurunkan tegangan dari 500kV ke 150kV atau dari 150kV ke 70kV. Yang kedua dilakukan pada gardu distribusi dari 150 kV ke 20 kV, atau dari 70kV ke 20 kV.

Saluran listrik dari sumber pembangkit tenaga listrik sampai transformator terakhir, sering disebut juga sebagai saluran transmisi, sedangkan dari transformator terakhir sampai konsumen disebut saluran distribusi atau saluran primer.

Ada dua macam saluran transmisi/distribusi PLN yaitu saluran udara (*overhed lines*) dan saluran kabel bawah tanah (*undergound cable*).

Kedua cara penyaluran tersebut masing-masing mempunyai keuntungan dan kerugian. Dari segi estetik, saluran bawah tanah lebih disukai dan juga tidak mudah terganggu oleh cuaca buruk: hujan, petir angin dan sebagainya.

Namun saluran bawah tanah jauh lebih mahal dibanding saluran udara, tidak cocok untuk daerah banjir karena bila terjadi gangguan / kerusakan, perbaikannya lebih sulit.



*Gambar 14.5 Saluran penghantar udara untuk rumah tinggal (mengganggu keindahan pandangan)*



Gambar 14.6 Saluran kabel bawah tanah pada suatu perumahan elit

Secara rinci keuntungan pemasangan saluran udara antara lain :

- + Biaya investasi untuk membangun suatu saluran udara jauh lebih murah dibandingkan untuk saluran dibawah tanah.
- + Untuk daerah-daerah yang tanahnya banyak mengandung batuan, akan lebih mudah dengan membuat lubang untuk tiang-tiang listrik.
- + Bila terjadi gangguan lebih mudah mencarinya dan lebih mudah memperbaikinya jika dibandingkan untuk saluran bawah tanah.

Sedangkan keuntungan pemasangan saluran bawah tanah antara lain :

- + Biaya pemeliharaan saluran kabel bawah tanah relatif murah.
- + Sambungan bawah tanah relatif tidak terganggu oleh pengaruh-pengaruh cuaca : hujan, angin, petir, salju, sabotase, pencurian kabel lebih sulit, gangguan layang-layang.
- + Saluran bawah tanah tidak mengganggu keindahan pandangan, tidak semerawut seperti saluran udara.

Pada akhir / ujung dari saluran transmisi, saluran masuk ke dalam suatu gedung / bangunan sebagai pengguna energi listrik.

Dari pertimbangan diatas, bahwa saluran udara lebih cocok di gunakan pada :

- saluran transmisi tegangan tinggi,
- daerah luar kota, misalnya di pegunungan atau daerah jarang penduduknya.

Sedangkan untuk saluran bawah tanah akan cocok digunakan pada :

- saluran transmisi tegangan rendah, kota-kota besar yang banyak penduduknya

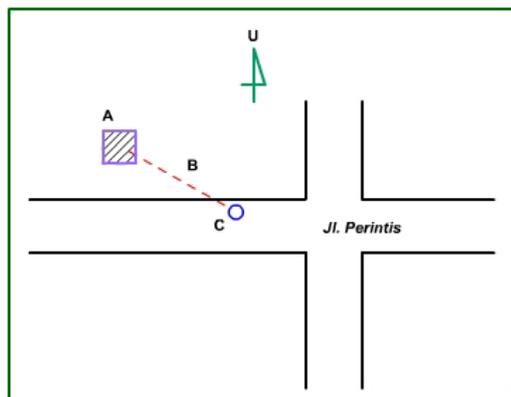
## Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Komponen/peralatan utama perlistrikan pada gedung/bangunan tersebut terdiri dari:

1. APP : Alat Pengukur dan Pembatas (milik PLN)
2. PHB : Papan Hubung Bagi
  - Utama / MDP : *Main Distribution Panel*
  - Cabang / SDP : *Sub Distribution Panel*
  - Beban / SSDP : *Sub-sub Distribution Panel*
3. Penghantar :
  - Kawat Penghantar (tidak berisolasi)
  - Kabel (berisolasi)
4. Beban
  - Penerangan : Lampu-lampu Listrik
  - Tenaga : Motor-motor Listrik

Dalam perencanaan instalasi listrik pada suatu gedung / bangunan, berkas rancangan instalasi listrik terdiri dari : gambar situasi, gambar instalasi, diagram garis tunggal dan gambar rinci.

### 4.5.1. Gambar Situasi



Keterangan :

- A : Lokasi bangunan
- B : Jarak bangunan ke tiang
- C : kode tiang / transformator
- U : menunjukkan arah utara

Gambar 14.7 Situasi

Yang menunjukkan gambar posisi gedung / bangunan yang akan dipasang instalasi listriknya terhadap saluran / jaringan listrik terdekat. Data yang perlu ditulis pada gambar situasi ini adalah alamat lengkap, jarak terhadap sumber listrik terdekat (tiang listrik / bangunan yang sudah berlistrik) untuk daerah yang sudah ada jaringan listriknya. Bila belum ada jaringan listriknya, perlu digambarkan rencana pemasangan tiang-tiang listrik.

### 14.5.2. Gambar Instalasi

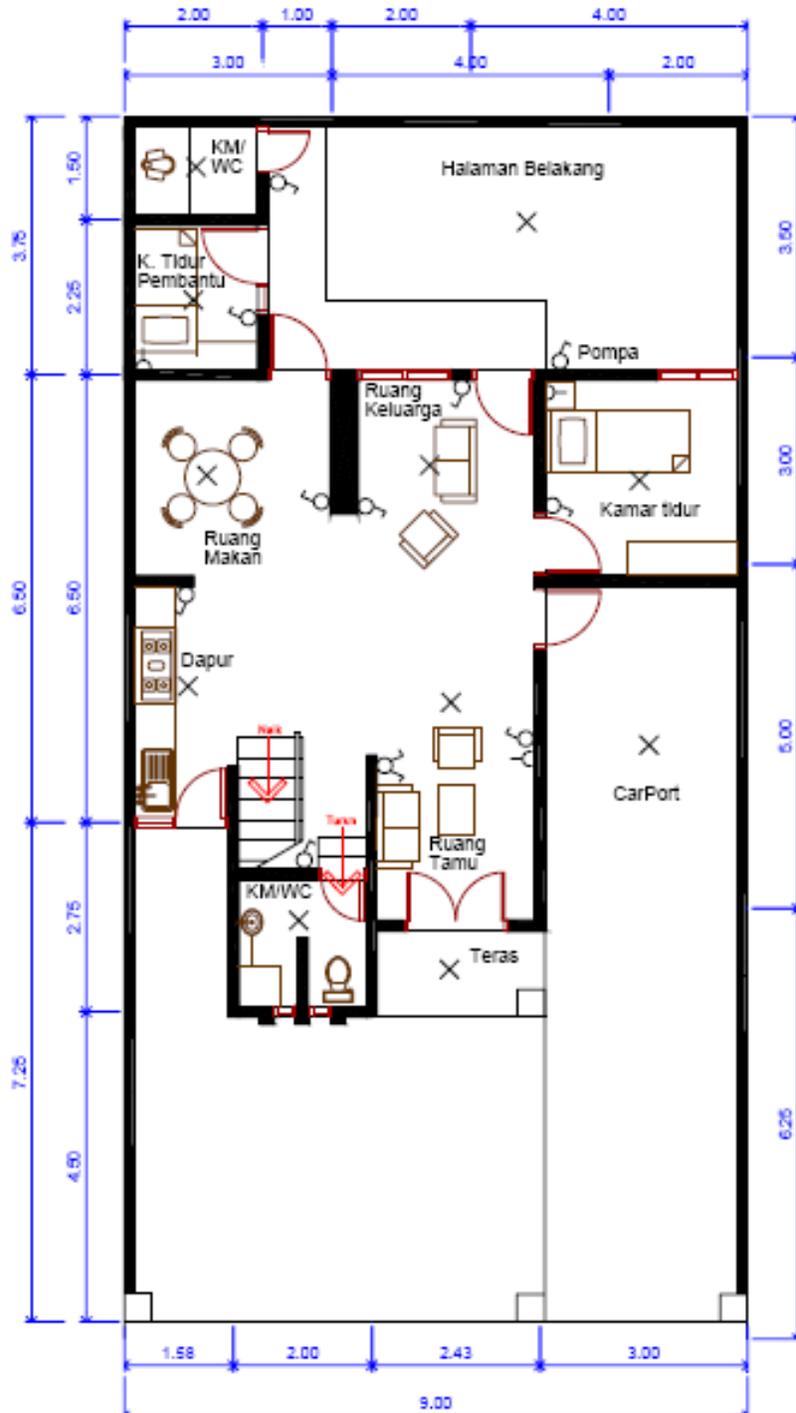
Yang menunjukkan gambar denah bangunan (pandangan atas) dengan rencana tata letak perlengkapan listrik dan rencana hubungan perlengkapan listriknya.

Saluran masuk langsung ke APP yang biasanya terletak didepan / bagian yang mudah dilihat dari luar. Dari APP ke PHB utama melalui kabel toefoer, yang biasanya berjarak rendah, dan posisinya ada didalam bangunan.

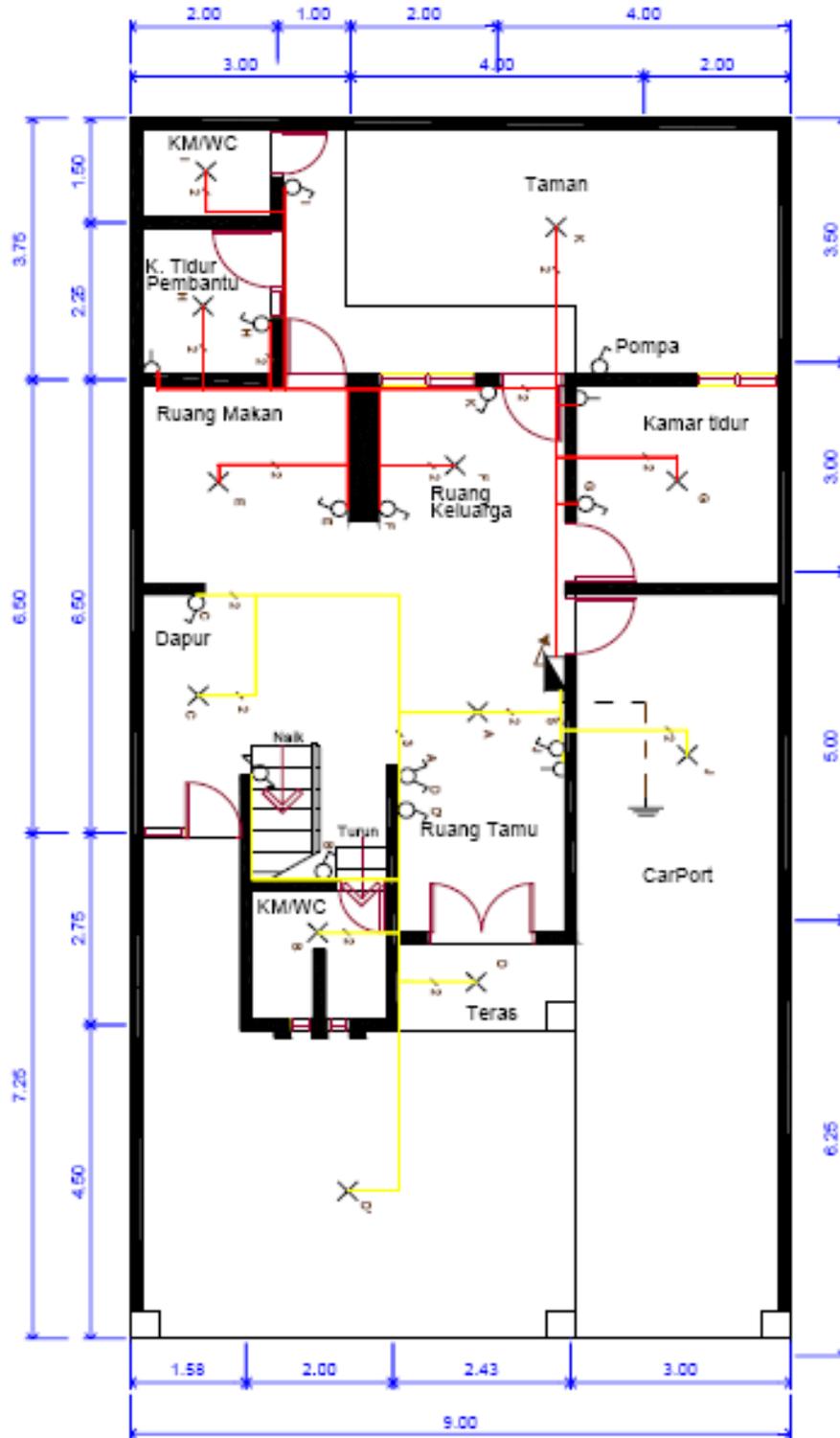
Pada PHB ini energi listrik didistribusikan ke beban menjadi beberap group / kelompok :

- Untuk konsumen domestik / bangunan kecil, dari PHB dibagi menjadi beberapa group dan langsung ke beban. Biasanya dengan sistem satu fasa.
- Untuk konsumen industri karena areanya luas, sehingga jarak ke beban jauh dari PHB utama dibagi menjadi beberapa group cabang / *Sub Distribution Panel* baru disalurkan ke beban.

## Sistem Distribusi Tenaga Listrik



Gambar 14.8 Denah rumah tipe T-125 lantai dasar

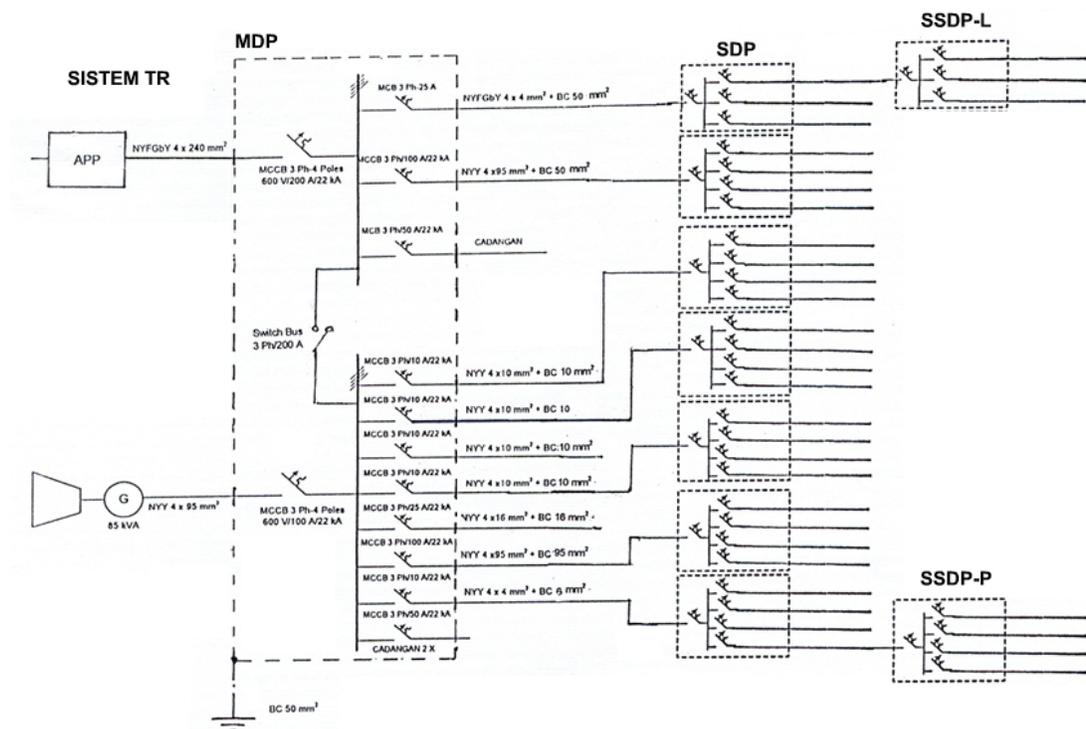


Gambar 14.9 Instalasi rumah tipe T-125 lantai dasar

### 14.5.3. Diagram Garis Tunggal

Diagram garis tunggal dari APP (alat pengukur dan pembatas) ke PHB (panel hubung bagi) utama yang di distribusikan ke beberapa group langsung ke beban (untuk bangunan berkapasitas kecil) dan melalui panel cabang (SDP) maupun sub panel cabang (SSDP) baru ke beban **gambar 14.10**.

Pada diagram garis tunggal ini selain pembagian group pada PHB utama / cabang / sub cabang juga menginformasikan jenis beban, ukuran dan jenis penghantar, ukuran dan jenis pengaman arusnya, dan sistem pembumian / pertanahannya **gambar 14.11**.



Gambar 14.10 Diagram satu garis instalasi listrik pada bangunan Tegangan Rendah 380/220V.



### 14.6. Alat Pengukur dan Pembatas (APP)

APP merupakan bagian dari pekerjaan dan tanggung jawab pengusaha ketenagalistrikan (PLN). Terdiri dari alat ukur kwh meter dan pembatas arus :

- 450 VA sampai dengan 4.400 VA untuk sistem satu fasa
- 4,9 kVA sampai dengan 630 kVA untuk sistem tiga fasa



Gambar 14.12 APP Sistem satu fasa



Gambar 14.13 APP Sistem tiga fasa

Tabel 14.6. Standar Daya PLN

Langganan tegangan rendah sistem 220V/380V 220 Volt satu fasa 380 Volt tiga fasa		
Daya Tersambung (VA)	Pembatas Arus (A)	Pengukuran
450	1 x 2	Alat ukur kwh meter satu fasa 220V dua kawat
900	1 x 4	
1.300	1 x 6	
2.200	1 x 10	
3.500	1 x 16	
4.400	1 x 20	
3.900	3 x 6	
6.600	3 x 10	
10.600	3 x 16	
14.200	3 x 20	
16.500	3 x 25	Alat ukur kwh meter tiga fasa 380V empat kawat
23.000	3 x 35	
33.000	3 x 50	
41.500	3 x 63	
53.000	3 x 80	
66.000	3 x 100	Alat ukur kwh meter tiga fasa 380V empat kawat dengan trafo arus tegangan rendah
82.000	3 x 125	
105.000	3 x 160	
131.000	3 x 200	
147.000	3 x 225	
164.000	3 x 250	
197.000	3 x 300	
233.000 *)	3 x 353	
279.000 *)	3 x 425	
329.000 *)	3 x 500	
414.000 *)	3 x 630	
526.000 *)	3 x 800	
630.000 *)	3 x 1.000	

Keterangan :

\*) : Tarif tegangan rendah diatas 200kVA hanya disediakan untuk tarif R-4

### 14.7. Panel Hubung Bagi (PHB)

Panel Hubung Bagi (PHB) adalah panel berbentuk alamari (*cubicle*), yang dapat dibedakan sebagai :

- Panel Utama / MDP : *Main Distribution Panel*
- Panel Cabang / SDP : *Sub Distribution Panel*
- Panel Beban / SSDP : *Sub-sub Distribution Panel*

Untuk PHB sistem tegangan rendah, hantaran utamanya merupakan kabel *feeder* dan biasanya menggunakan NYFGBY.

Di dalam panel biasanya busbar / rel dibagi menjadi dua segmen yang saling berhubungan dengan saklar pemisah, yang satu mendapat saluran masuk dari APP (pengusaha ketenagalistrikan) dan satunya lagi dari sumber listrik sendiri (genset).

Dari kedua busbar didistribusikan ke beban secara langsung atau melalui SDP dan atau SSDP. Tujuan busbar dibagi menjadi dua segmen ini adalah jika sumber listrik dari PLN mati akibat gangguan ataupun karena pemeliharaan, maka suplai ke beban tidak akan terganggu dengan adanya sumber listrik sendiri (genset) sebagai cadangan.

Peralatan pengaman arus listrik untuk penghubung dan pemutus terdiri dari :

- CB (*Circuit Breaker*)
- MCB (*Miniatur Circuit Breaker*)
- MCCB (*Mold Case Circuit Breaker*)
- NFB (*No Fuse Circuit Breaker*)
- ACB (*Air Circuit Breaker*)
- OCB (*Oil Circuit Breaker*)
- VCB (*Vacuum Circuit Breaker*)
- SF6CB (*Sulfur Circuit Breaker*)
- Sekering dan pemisah
- Switch dan DS (*Disconnecting Switch*)

Peralatan tambahan dalam PHB antara lain :

- Rele proteksi
- Trafo tegangan, Trafo arus
- Alat-alat listrik : Ampermeter, Voltmeter, Frekuensi meter, Cos  $\phi$  meter
- Lampu indikator
- dll

Contoh gambar diagram satu garisnya bisa dilihat pada gambar 14.10. Untuk PHB sistem tegangan menengah, terdiri dari tiga cubicle yaitu satu *cubicle incoming* dan *cubicle outgoing*.

Hantaran masuk merupakan kabel tegangan menengah dan biasanya dengan kabel XLPE atau NZXSBY. Saluran daya tegangan menengah ditransfer melalui trafo distribusi ke LVMDP (*Low Voltage Main Distribution Panel*). Pengaman arus listriknya terdiri dari sekering dan LBS (*Load Break Switch*).

Peralatan dan rangkaian dari busbar sampai ke beban seperti pada PHB sistem tegangan rendah. Contoh gambar diagram satu garisnya bisa dilihat pada gambar 14.11.

Berikut ini adalah salah satu contoh cubicle yang ada di ruang praktek di POLBAN.



Gambar 14.14 Contoh Panel Cubicle di ruang Praktek POLBAN

### 14.7.1. MCB (Miniatur Circuit Breaker)

MCB adalah pengaman rangkaian yang dilengkapi dengan pengaman thermis (bimetal) untuk pengaman beban lebih dan juga dilengkapi relai elektromagnetik untuk pengaman hubung singkat. MCB banyak digunakan untuk pengaman sirkit satu fasa dan tiga fasa. Keuntungan menggunakan MCB, yaitu :

1. Dapat memutuskan rangkaian tiga fasa walaupun terjadi hubung singkat pada salah satu phasanya.

## Sistem Distribusi Tenaga Listrik

---

2. Dapat digunakan kembali setelah rangkaian diperbaiki akibat hubung singkat atau beban lebih.
3. Mempunyai tanggapan yang baik apabila terjadi hubung singkat atau beban lebih.

Pada MCB terdapat dua jenis pengaman yaitu secara termis dan elektromagnetis, pengaman termis berfungsi untuk mengamankan arus beban lebih sedangkan pengaman elektromagnetis berfungsi untuk mengamankan jika terjadi hubung singkat.

Pengaman termis pada MCB memiliki prinsip yang sama dengan thermal overload yaitu menggunakan dua buah logam yang digabungkan (bimetal), pengaman secara termis memiliki kelambatan, ini bergantung pada besarnya arus yang harus diamankan, sedangkan pengaman elektromagnetik menggunakan sebuah kumparan yang dapat menarik sebuah anker dari besi lunak.

MCB dibuat hanya memiliki satu kutub untuk pengaman satu fasa, sedangkan untuk pengaman tiga fasa biasanya memiliki tiga kutub dengan tuas yang disatukan, sehingga apabila terjadi gangguan pada salah satu kutub maka kutub yang lainnya juga akan ikut terputus.



(a) MCB 1 fasa

(b) MCB 3 fasa

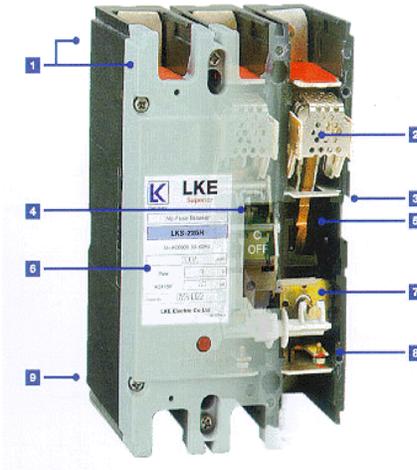
Gambar 14.15 MCB (Miniatur Circuit Breaker)

### 14.7.2. MCCB (Molded Case Circuit Breaker)

MCCB merupakan alat pengaman yang dalam proses operasinya mempunyai dua fungsi yaitu sebagai pengaman dan sebagai alat untuk penghubung.

Jika dilihat dari segi pengaman, maka MCCB dapat berfungsi sebagai pengaman gangguan arus hubung singkat dan arus beban lebih. Pada

jenis tertentu pengaman ini, mempunyai kemampuan pemutusan yang dapat diatur sesuai dengan yang diinginkan.



Gambar 14.16 Molded Case Circuit Breaker

Keterangan :

1. BMC material for base and cover
2. Arc chute
3. Mounting for ST or UVT connection block
4. Trip-free mechanism
5. Moving contacts
6. Clear and IEC-complaint markings
7. Magnetic trip unit
8. Compact size

### 14.7.3. ACB (Air Circuit Breaker)

ACB (*Air Circuit Breaker*) merupakan jenis *circuit breaker* dengan sarana pemadam busur api berupa udara. ACB dapat digunakan pada tegangan rendah dan tegangan menengah. Udara pada tekanan ruang atmosfer digunakan sebagai peredam busur api yang timbul akibat proses *switching* maupun gangguan.



Gambar 14.17 ACB (Air Circuit Breaker)

*Air Circuit Breaker* dapat digunakan pada tegangan rendah dan tegangan menengah. Rating standar *Air Circuit Breaker* (ACB) yang dapat dijumpai dipasaran adalah sbb:

- **LV-ACB:**

$U_e = 250V$  dan  $660V$

$I_e = 800A-6300A$

$I_{cn} = 45kA-170kA$

- **LV-ACB:**

$U_e = 7,2kV$  dan  $24kV$

$I_e = 800A-7000A$

$I_{cn} = 12,5kA-72kA$

### 14.7.4. OCB (Oil Circuit Breaker)

*Oil Circuit Breaker* adalah jenis CB yang menggunakan minyak sebagai sarana pemadam busur api yang timbul saat terjadi gangguan. Bila terjadi busur api dalam minyak, maka minyak yang dekat busur api akan berubah menjadi uap minyak dan busur api akan dikelilingi oleh gelembung-gelembung uap minyak dan gas. Gas yang terbentuk tersebut mempunyai sifat *thermal conductivity* yang baik dengan tegangan ionisasi tinggi sehingga baik sekali digunakan sebagai bahan media pemadam loncatan bunga api.



Gambar 14.18 OCB (Oil Circuit Breaker)

#### 14.7.5. VCB (Vacuum Circuit Breaker)

Pada dasarnya kerja dari CB ini sama dengan jenis lainnya hanya ruang kontak dimana terjadi busur api merupakan ruang hampa udara yang tinggi sehingga peralatan dari CB jenis ini dilengkapi dengan *seal* penyekat udara untuk mencegah kebocoran.



Gambar 14.19 VCB (Vakum Circuit Breaker)

### 14.7.6. SF6 CB (Sulfur Hexafluoride Circuit Breaker)

SF6 CB adalah pemutus rangkaian yang menggunakan gas SF6 sebagai sarana pemadam busur api. Gas SF6 merupakan gas berat yang mempunyai sifat dielektrik dan sifat memadamkan busur api yang baik sekali. Prinsip pemadaman busur apinya adalah Gas SF6 ditiupkan sepanjang busur api, gas ini akan mengambil panas dari busur api tersebut dan akhirnya padam. Rating tegangan CB adalah antara 3.6 KV – 760 KV.



Gambar 14.20 SF6 CB (Sulfur Hexafluoride Circuit Breaker)

### 14.8. Penghantar

Untuk instalasi listrik, penyaluran arus listriknya dari panel ke beban digunakan penghantar listrik yang sesuai dengan penggunaannya.

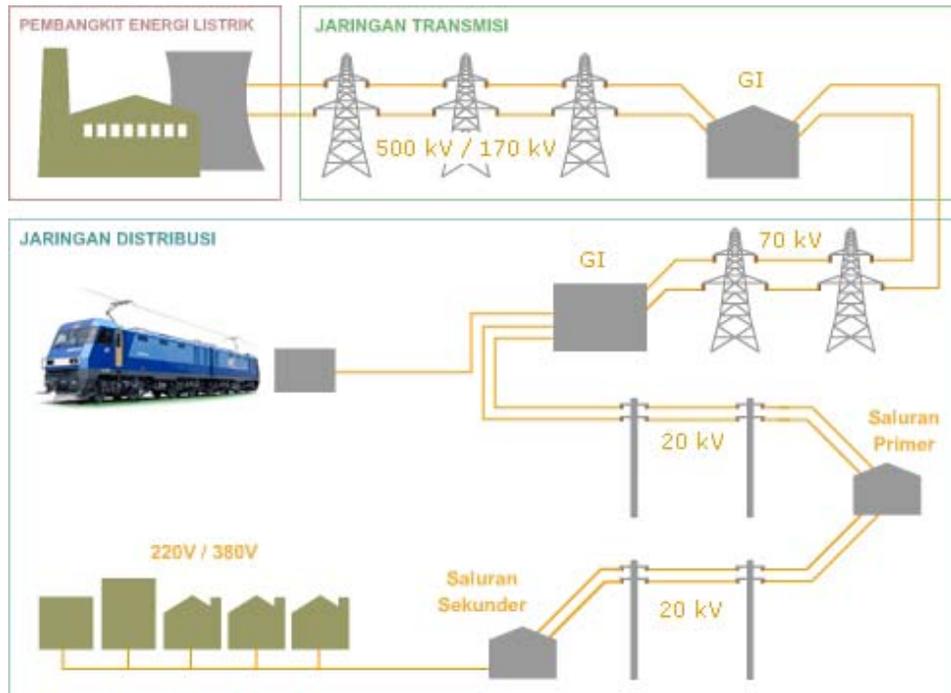
Ada dua macam penghantar listrik yaitu :

- **Kawat**  
Penghantar tanpa isolasi (telanjang) yang dibuat dari Cu, AL sebagai contoh BC, BCC, A2C, A3C, ACSR.
- **Kabel**  
Penghantar yang terbungkus isolasi, ada yang berinti tunggal atau banyak, ada yang kaku atau berserabut, ada yang dipasang di udara atau di dalam tanah, dan masing-masing digunakan sesuai dengan kondisi pemasangannya.

## Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Hal ini bisa dilihat dari masing-masing karakter jenis kabelnya pada nomen klatur kabel. Sebagai contoh : NYA, NYM, NYY, NYMHY, NYYHY, NYFGBY

Berikut ini adalah gambar diagram satu garis untuk konsumen tegangan rendah dan konsumen tegangan tinggi.



Gambar 14.21 Diagram Transmisi dan Distribusi

### 14.9. Beban Listrik

Menurut sifatnya, beban listrik terdiri dari :

- Resistor (R) yang bersifat resistip
- Induktor (L) yang bersifat induktip
- Kapasitor (C) yang bersifat kapasitip

Beban listrik yang dimaksud adalah piranti / peralatan yang menggunakan / mengkonsumsi energi listrik. Secara garis besar beban listrik adalah :

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



$$\frac{40 + 10}{0,8.220} = 0,28 \text{ A}$$

Maka untuk 300 lampu =  $300 \cdot 0,28 \text{ A} = 84 \text{ A}$

- Bila lampu menyala sekaligus :  
 $I_R = 84 \text{ A}$  ;  $I_S = 84 \text{ A}$ ;  $I_T = 84 \text{ A}$
- Lampu dibagi dalam group (tiap group maksimum 12-14 titik lampu), bila tiap titik terdiri dari 2 TL, maka tiap fasa terdapat  $300 \text{ TL}/2 = 150$  armatur (titik lampu) dan tiap fasa mempunyai 150 armatur = 12,5 ~13 group.
- Satu group adalah 12 armatur x 2 TL = 24 TL jadi arus listrik tiap group =  $24 \times 0,28 = 6,72 \text{ A}$  dengan demikian pengaman yang digunakan (MCB atau Sekering) tiap group dapat digunakan 10A.
- Arus listrik tiap fasa panel utama =  $13 \times 6,72 \text{ A} = 87,36 \text{ A}$  maka pengaman utama (MCB atau Sekering) yang digunakan sebesar 100A.

### 14.9.2. Stop Kontak



Stop Kontak adalah istilah populer yang biasa digunakan sehari-hari. Dalam PUIL 2000, stop kontak ini dinamakan KKB (Kotak Kontak Biasa) dan KKK (Kotak Kontak Khusus) KKB adalah kotak kontak yang dipasang untuk digunakan sewaktu-waktu (tidak secara tetap) bagi piranti listrik jenis apapun yang memerlukannya, asalkan penggunaannya tidak melebihi batas kemampuannya.

KKK adalah kotak kontak yang dipasang khusus untuk digunakan secara tetap bagi suatu jenis piranti listrik tertentu yang diketahui daya maupun tegangannya.

Gambar 14.23 Macam-macam Stop Kontak

Dengan demikian, KKK mempunyai tempat/lokasi tertentu dengan beban tetap, dan dihubungkan langsung ke panel sebagai group tersendiri.

## Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sedangkan KKB tersebar diseluruh bangunan dengan beban tidak tetap, dan biasanya jadi satu dengan group untuk penerangan.

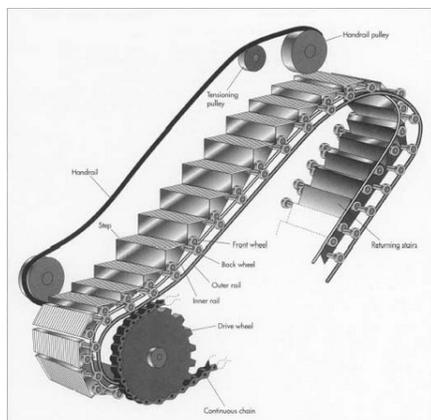
### 14.9.3. Motor-motor Listrik

Motor-motor listrik merupakan beban kedua terbanyak sesudah penerangan, motor listrik digunakan untuk menggerakkan pompa, kipas angin, kompresor yang merupakan bagian penting dari sistem pendingin udara, dan juga sebagai penggerak mesin-mesin industri, elevator, escalator dan sebagainya. Motor dikategorikan sebagai motor fraksional (kurang dari 1 HP), integral (diatas 1 HP), dan motor kelas medium sampai besar (diatas 5 HP).

Motor-motor juga dapat dikelompokan berdasarkan jenis arus yang digunakan, yaitu:

- Motor arus searah
- Motor arus bolak-balik satu phasa
- Motor arus bolak-balik tiga phasa

Berikut ini adalah gambar beberapa berbagai piranti yang menggunakan motor.



Eskalator



Air Conditioning

Gambar 14.24 Piranti-piranti menggunakan motor

### 14.10. Rangkuman

- Manusia memakai energi alam (kayu, air, angin) sejak awal peradaban dimulai, sejak abad 18 batubara digunakan untuk menghasilkan uap dikenal sebagai era industri di Inggris.
- Sampai sekarang hasil penelitian menghasilkan beberapa sumber energi, diantaranya: Energi Mekanik; Energi Medan Magnet; Energi Grafitasi; Energi Nuklir; Energi Sinar; Energi Panas; Energi Listrik.
- Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa energi itu tidak dapat diciptakan ataupun dimusnahkan, tetapi dapat berubah dari energi satu ke energi lainnya.
- Tahun 1885 di Perancis dipakai energi listrik secara komersial terbatas, di Indonesia energi listrik diusahakan sejak 1887 di Jakarta, kemudian dibangun beberapa PLTA sejak 1917.
- Perusahaan listrik di Indonesia sebelum kemerdekaan oleh beberapa perusahaan swasta Hindia Belanda, seperti: NIGEM; OGEM; ANIEM, GEBEO.
- Sejak 1958 kelistrikan di Indonesia dikelola oleh Perum Listrik Negara.
- Pelanggan listrik PLN di kelompokkan menurut empat jenis, yaitu konsumen Rumah Tangga, Penerangan Jalan Umum (PJU), konsumen Pabrik, Konsumen Komersial.
- Secara garis besar energi listrik dibagi dua kelompok, yaitu penyedia daya (pembangkitan dan transmisi) dan pemanfaat (konsumen).
- Standar PLN untuk tarif jaringan tegangan rendah 380/220V, adalah tarif S-2, S-3, R-1, R-2, R-4, U-1, U-2, G-1, I-1, I-2, I-3, H-1 dan H-2.
- Standar PLN jaringan distribusi tegangan menengah 20KV, adalah tarif S-4, SS-4, I-4, U-3, H-3 dan G-2.
- Dari pusat pembangkit (6KV) listrik di transmisikan (150-500KV) ke kota-kota besar, masuk ke jaringan 70 KV dan system distribusi tegangan menengah 20KV, terakhir ke konsumen tegangan rendah 380/220V.
- Penyaluran listrik tegangan rendah dengan penghantar udara atau dengan kabel tanah.
- Komponen penyaluran energi listrik ke konsumen terdiri atas APP (alat pengukur dan pembatas), PHB (papan hubung bagi), penghantar, dan beban
- Dalam perencanaan instalasi listrik pada suatu gedung/bangunan, rancangan instalasi listrik terdiri dari : gambar situasi, gambar instalasi, diagram garis tunggal dan gambar rinci.

## Sistem Distribusi Tenaga Listrik

---

- APP dimiliki dan tanggungjawab PLN, mencakup kWhmeter dan pembatas arus (MCB).
- PHB tempat pembagian ke cabang beban, dilengkapi alat pengaman.
- Peralatan pengaman arus listrik untuk penghubung dan pemutus terdiri dari :CB (*Circuit Breaker*), MCB (*Miniatur Circuit Breaker*); MCCB (*Mold Case Circuit Breaker*); NFB (*No Fuse Circuit Breaker*); ACB (*Air Circuit Breaker*); OCB (*Oil Circuit Breaker*); VCB (*Vacuum Circuit Breaker*); SF6CB (*Sulfur Circuit Breaker*); *Sekering dan pemisah*; Switch dan Disconnecting Switch (DS).
- Peralatan tambahan dalam PHB antara lain : Rele proteksi ; Trafo tegangan, Trafo arus; Alat-alat listrik : Amperemeter, Voltmeter, Frekuensi meter, Cos  $\phi$  meter, Lampu indikator
- Ada dua macam penghantar listrik yaitu : Kawat (telanjang) dan Kabel.
- Menurut sifatnya, beban listrik terdiri dari : Resistor (R) yang bersifat resistip; Induktor (L) yang bersifat induktip dan Kapasitor.
- Motor-motor dikelompokkan berdasarkan jenis arus yang digunakan, yaitu: Motor DC; Motor AC satu fasa; Motor AC tiga fasa.

### 14.11. Soal-soal

1. Jelaskan secara singkat bahwa energi alam (kayu, air, angin) dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi oleh manusia pada saat energi listrik belum ditemukan.
2. Jelaskan bagaimana batubara dapat diubah menjadi energi uap yang selanjutnya menggerakkan mesin uap (*James Watt*).
3. Energi listrik dengan tegangan 1500 Volt DC dapat menggerakkan Kereta Rel Listrik, jelaskan secara singkat cara kerja KRL.
4. Sebutkan pemakain listrik arus DC untuk proses industri, dapatkan listrik DC berasal dari listrik AC ? jelaskan
5. Sebutkan pemakaian listrik AC 1 fasa dan AC 3 fasa di Industri.
6. PLTA dibangun di daerah pegunungan yang jauh dari perkotaan, gambarkan secara skematik penyaluran daya listrik dari pembangkitan sampai ke konsumen industri Dan konsumen rumah tangga.
7. Energi minyak makin Mahal (\$130/barel), pengadaan energi listrik alternatif adalah salah satu jawaban atas krisis energi, jelaskan skematik pembangkitan listrik Mikrohidro skala 100 KW dipedesaan, sampai pemanfaatannya untuk rumah tangga dan industri kecil UKM.

## **Sistem Distribusi Tenaga Listrik**

---

8. Beban listrik 1.000 watt bekerja selama 5 jam. Hitung berapa energi listrik yang dikonsumsi.
9. Jika harga energi adalah Rp 700/kWh, berapa harga energi yang harus dibayar pada soal No 3 diatas.
10. Suatu bangunan disuplai listrik 3 phasa, 4 kawat dengan tegangannya 220V/380V, frekuensi 50 HZ. Beban yang ada 400 lampu TL 40 W; 220 V;  $\cos \phi = 0,8$ , balast 10 W, Bagaimana instalasinya?

## **BAB 15**

# **PEMBANGKIT LISTRIK MIKROHYDRO**

### **Daftar Isi :**

- 15.1. Pembangkit Mikrohidro
- 15.2. Sistem Mikrohidro
- 15.3. Langkah Pertama Keselamatan
- 15.4. Peringatan Tentang Pengoperasian Mikrohidro
- 15.5. Memilih Lokasi Mikrohidro
- 15.6. Desain Bendungan
- 15.7. Komponen Generator Mikrohidro
- 15.8. Instalasi Mikrohidro
- 15.9. Pengoperasian
- 15.10. Perawatan Dan Perbaikan
- 15.11. Spesifikasi Teknik
- 15.12. Rangkuman
- 15.13. Soal-soal

### 15.1. Pembangkit Mikrohidro

Pembangkitan Listrik Mikrohidro, pembangkitan listrik dihasilkan oleh Generator listrik DC atau AC. Mikrohidro berasal dari kata *micro* yang berarti kecil dan *hydro* artinya air, arti keseluruhan adalah pembangkitan listrik daya kecil yang digerakkan oleh tenaga air. Tenaga air berasal dari aliran sungai kecil atau danau yang dibendung dan kemudian dari ketinggian tertentu dan memiliki debit yang sesuai akan menggerakkan Turbin yang dihubungkan dengan Generator listrik.

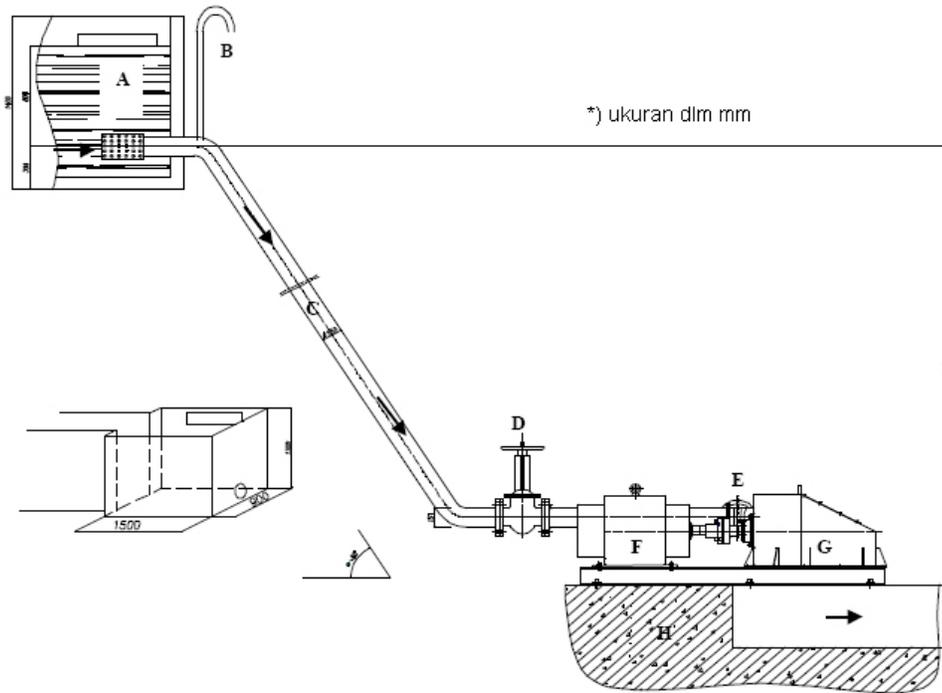


Gambar 15.1. Turbin dan Generator Mikrohidro

Generator yang digunakan untuk Mikrohidro dirancang mudah untuk dioperasikan dan dipelihara, didesain menunjang keselamatan, tapi peralatan dari listrik akan menjadi berbahaya bila tidak digunakan dengan baik. Beberapa point dari pedoman ini, instruksinya menunjukkan hal yang wajib diperhatikan dan harus diikuti seperti ditunjukkan berikut ini:

### 15.2. Sistem Mikrohidro

Sistem Mikrohidro **gambar 15.2** terdiri dari penampungan air dalam bentuk bendungan kecil (A), melalui sebuah pipa yang ujungnya dipasangkan filter untuk menyaring air sehingga kotoran tidak masuk ke pipa dan Turbin.



Gambar 15.2 Sistem Pembangkit Listrik Mikrohidro

**Keterangan gambar 15.2**

- A. Tangki air dari bendungan
- B. Pipa lubang angin
- C. Pipa pesat atau *Pipa pesat*
- D. Katup pembuka atau *Gate valve*
- E. *Spear valve*
- F. Generator
- G. Turbin
- H. Dudukan Turbin

Pipa menuju Turbin sering disebut pipa pesat (C), dilengkapi dengan pipa pernapasan udara (B) gunanya agar udara yang terjebak dalam pipa bisa keluar dan tidak menghantam sudu-sudu Turbin. Katup pembuka (D) dipasang sebelum Turbin, gunanya untuk menutup aliran air ke Turbin, ketika dilakukan perbaikan berkala pada Turbin. Aliran air dari pipa pesat melewati katup spear (E) untuk mengatur debit air yang masuk ke Turbin air (G). Akibat energi potensial air, sudu-sudu Turbin akan memutar poros Turbin yang dikopel langsung dengan Generator listrik (F). Generator akan menghasilkan energi listrik yang siap digunakan untuk berbagai kebutuhan. Air buangan dialirkan ke saluran pembuangan dan kembali kesungai.

### 15.3. Langkah Pertama Keselamatan

Listrik membantu kehidupan kita, tapi listrik menjadi berbahaya jika pencegahan yang sederhana tidak dipatuhi

1. Jangan pernah membiarkan sambungan listrik basah. Hati-hati terhadap bahaya sentuhan dan kejutan listrik.
2. Jangan coba-coba untuk memutuskan kabel atau membuka alat untuk perbaikan saat Generator sedang kerja. Cabut kabel utama terlebih.
3. Beritahukan anak-anak tentang bahaya sentuhan langsung ke listrik. Jangan izinkan mereka bermain dengan sambungan listrik.
4. Jauhkan jari dari Turbin yang berputar.
5. Jika ada pertanyaan tentang keselamatan, tanyakan pada ahlinya.
6. Badan Generator Mikrohidro harus di bumikan.

### 15.4. Peringatan Tentang Pengoperasian Mikrohidro

Generator Mikrohidro (GMH) didesain agar mudah untuk dioperasikan dan mudah untuk diperbaiki. Bagaimanapun juga peringatan mengenai langkah pengoperasian harus dituruti untuk menjaga kelangsungan usia pakai GMH.

- Dibawah kondisi ketinggian air yang telah ditentukan pedoman ini, GMH mampu membangkitkan tenaga yang besar dari output rata-rata. Juga dapat terjadi jika diameter pipa melebihi diameter yang disarankan. Jika pemakaian tenaga melebihi daya maksimum yang terdapat di pedoman ini, kerusakan Generator Mikrohidro mungkin tidak dapat diperbaiki dan membutuhkan pengawatan total/ *total rewiring*.
- Jangan lupa untuk melumasi bearing pada waktu yang telah disarankan. jika tidak dilakukan akan mengakibatkan penggunaan yang melebihi batas sehingga umurnya akan pendek.
- Pastikan *Electronic Load Kontroller* di set kurang lebih pada 220V. Selain itu, beban besar dan peralatan mungkin harus dikurangi..

### 15.5. Memilih Lokasi Mikrohidro

Ada dua faktor yang mempengaruhi output daya Generator Mikrohidro, yaitu ketinggian jatuh air dan debit aliran. Ketinggian jatuh air merupakan jarak vertical antara Turbin dengan bendungan air, yang diukur dalam meter. Debit aliran merupakan jumlah dari air yang melewati Turbin tiap waktu, yang diukur dalam liter/detik. tabel berikut menunjukkan bermacam kombinasi ketinggian dan aliran air untuk mencapai output daya maksimum yang diinginkan untuk tiap model :

$$\text{Daya output Generator} \quad P_{out} = 9,8 H. Q \quad \dots \text{ KW}$$

Dimana :

H = tinggi efektif jatuh air (m)

Q = debit air liter/detik

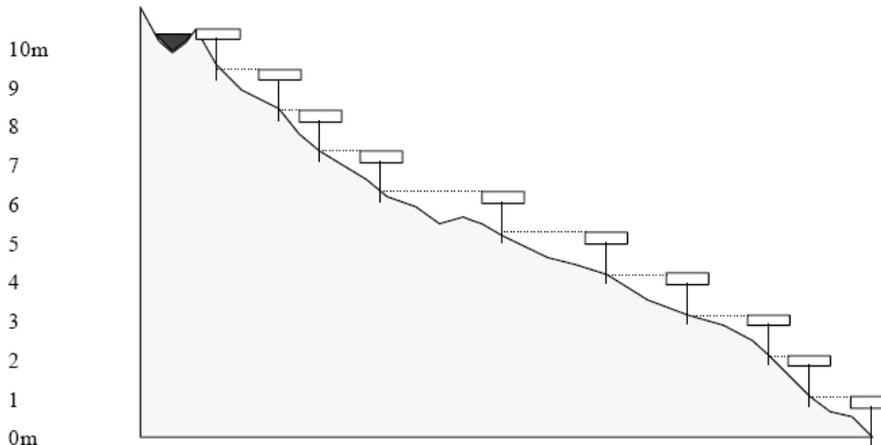
Tabel 15.1. Daya Output hubungannya dengan tinggi dan debit

Ketinggian air H (m)	24m	26m	28m	30m	32m	34m
Aliran air Q (l/ sec)	33.3	34.6	36.0	37.2	38.4	39.6
Output Turbin (kW)	5.9	6.7	7.4	8.2	9.0	10.0
Output Gen. (kW)	4.7	5.3	5.9	6.6	7.2	8.0

Sebagai contoh, jika ketinggian jatuh air 24 meter dan debit aliran air 33.3 liter/detik, menggunakan table maka akan menghasilkan daya listrik sampai 4.7 kW.

### 15.5.1. Pengukuran Ketinggian

Ketinggian jatuh air merupakan tinggi vertikal dimana air mengalir masuk ke *pipa pesat* lalu turun ke permukaan Turbin. Ini ditunjukkan pada gambar sistem. Untuk mengukur, gunakan pita pengukur/ meteran dan klinometer atau spirit level. Kurang akurat tapi digunakan sebagai cara alternatif yang bermanfaat untuk anda membuatnya sendiri dari setengah tube/botol transparan yang diisi dengan air. Ikatlah dibagian atas dari 1 meter panjang stik lalu ujung bagian horizontal dari ujung atas bagian yang miring seperti tingkatan arus.



Gambar 15.3 Mengukur ketinggian jatuh air.

#### Pengukuran ketinggian

Jalan ke atas daerah dari tempat landai dimana kamu akan menempatkan Turbin ke sumber air berada atau lakukan kebalikannya, jalan ke bawah dari tempat landai darimana sumber air berada ke tempat terbaik untuk menempatkan Turbin

Dengan menuju tingkatan yg diraih dan mengulang kembali prosesnya ketinggian total dapat terukur **gambar 15.3**. Metode lain digunakan untuk pengukur tekanan dan panjang selang yang akurat. Pengukuran tekanan menunjukkan 1.422 psi / meter dari ketinggian. Sebagai contoh ketinggian 24m tekanan 34psi sampai ketinggian 34m dengan tekanan 48psi.

Untuk kedua model mikrohidro tertentu, ketinggian harusnya antara 24m dan 34m. jika ukurannya lebih pendek, maka output yang dihasilkan akan berkurang. Tapi bila lebih besar maka daya keluarannya pun akan bertambah. Bertambah besarnya daya keluaran memang menguntungkan, tapi jika terlalu tinggi rotor akan berputar sangat cepat dan mengakibatkan berkurangnya umur bearing. Jangan mencoba untuk melebihi ketinggian yang telah disarankan.

### 15.5.2. Pengukuran Aliran

Jalan terbaik untuk mengukur aliran air ialah dengan menggunakan “*metoda bendungan*”. Lakukan pengukuran sendiri atau minta petunjuk konsultan ahli yang berpengalaman. Metode lainnya ialah “*metode bejana/ bak*”. Ambil bagian pipa yang memiliki diameter yang sama dengan pipa pesat, masukan ke kali atau bendungan dimana ada aliran datang dan lakukan pengukuran aliran dari sini.

Dari **gambar 15.4** dibawah, pipa yang pendek (kurang dari 1 meter) dipendam kedalam “bendungan” kecil gunakan lumpur atau semen. Ujung atas pipa berada dibawah permukaan air dan bagian pipa lainnya mengalirkan air dari kali. Ketika muncul aliran yg tenang, segera tempatkan ember untuk



menampung aliran dan saat itu adalah waktu untuk mengisi ember. Ukuran ember untuk menampung air berkisar 100-200 liter (setengah atau memenuhi tong minyak kosong). Bagi volume ember (dalam liter) dengan waktu pemenuhan (dalam detik) untuk memperoleh aliran rata-rata dalam liter per detik.

Gambar 15.4 Mengukur Debit Air

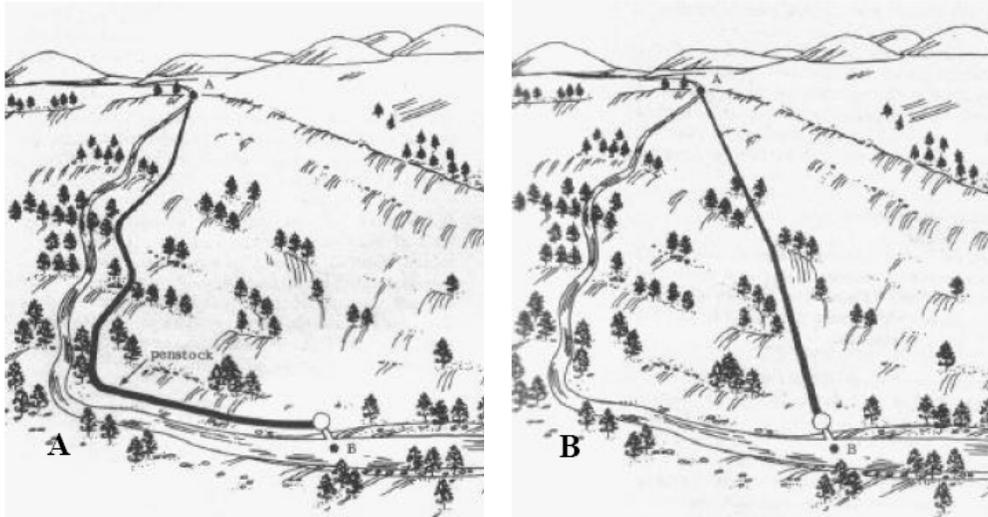
#### Pengukuran Aliran :

$$\text{Aliran} = \frac{\text{Volume ember (liter)}}{\text{Waktu untuk memenuhi ember (detik)}}$$

### 15.5.3 Persiapan Lokasi Mikrohidro

Saat lokasi ketinggian dan aliran sudah pada tempat yang benar baru kemudian panjang dan posisi pipa pesat dapat ditentukan. Selain ketinggian vertikal penting yang harus diperhatikan tingkat kemiringan horizontal dan panjang pipa pesat dapat berubah walaupun kemiringan pipa pesat yang seharusnya  $>60^{\circ}$ .

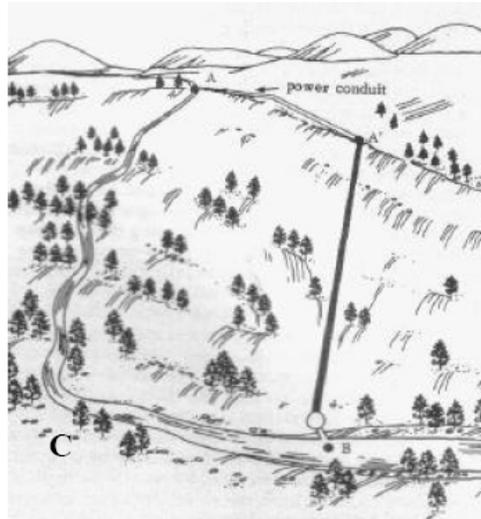
Pipa pesat harus terbuat dari baja dengan diameter 150mm dan ketebalan 4mm. Katup gate harus dipasang agar dapat menutup kapan saja saat terjadi tekanan tinggi diujung pipa pesat. Jalan terbaik untuk mengurangi panjang pipa pesat ditunjukkan pada **gambar 15.5a dan 15.5b**.



Gambar 15.5. Jalur pipa a) yang melingkar b) jalur memintas

Pipa pesat diwakili oleh garis hitam A-B. pada gambar yang pertama (A) pipa pesat mengikuti jalur kali. Ini merupakan pemborosan panjang dan biaya. Pada gambar B, jalur yang paling gampang(langsung) dipilih untuk mengurangi panjang dan biaya. Gambar C menunjukkan dimana jalur saluran alternatif atau "power conduit" memotong sisi bukit. Air yang dibawa ketempat Turbin sebelumnya dan mengurangi panjang pipa pesat yang dibutuhkan.

Saluran pipa air mengikuti kontur bukit dan hanya memerlukan parit sederhana yang luasnya 30cm x 30cm. Saat memasang pipa pesat, coba jaga agar selalu lurus dan terhindar, cobalah untuk membuatnya tetap berdiri dan memghindari bagian tajam atau sudut. Untuk melakukannya, bagian dari puncak kemiringan mungkin membutuhkan penggalian saat (ditempat lain) pipa pesat mungkin membutuhkan kutub bantu dsb.



Gambar 15.6 Pipa melintas dan pembuangan air ke sungai

Bendungan atau tangki penampung air di atas pipa pesat di desain agar dapat menampung volume air kira-kira 2.5 kali volume air di pipa pesat [1750 liter]. Ukuran desain yang ideal ditunjukkan pada gambar sistem walau pada point utama digunakan untuk memastikan jangan sampai bendungan kosong. Bagian atas pipa pesat biasanya tidak ditempatkan dibawah tapi beberapa jalur dinding bagian atas bendungan jadi bagian bawah bendungannya seolah mengendap agar dapat menarik, pasir, lumpur, dls. Dari aliran yg Turbin yang tersumbat.

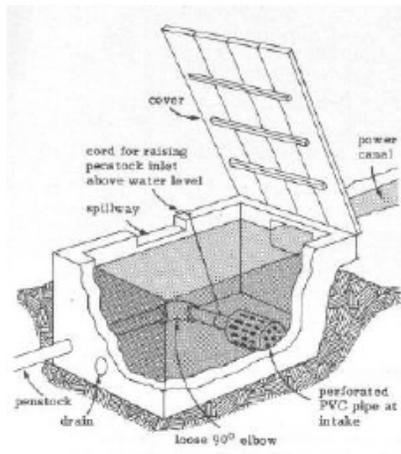
### 15.6. Desain Bendungan

Aspek terpenting bagl bendungan diantaranya :

- 1) Membiarkan air mengalir terus menerus ke pipa pesat, sehingga Turbin terus berfungsi
- 2) Memiliki pengaman yang cukup untuk mencegah pasir, tumbuh-tumbuhan atau kotoran lainnya masuk kedalam pipa pesat karena dapat mengganggu Turbin. Mencakup aspek keselamatan untuk menjauhkannya dari jangkauan anak dan binatang yang mungkin masuk kedalam pipa pesat.
- 3) Memiliki jalur yang memudahkan untuk menghentikan aliran air saat mengganti bearing, dsb.

Gambar 15.7. menunjukkan tandon air yang didesain sederhana yang bias digunakan untuk segala keberhasilan.

Saringan sampah akan membantu menjaga agar bendungan selalu bersih dan tertutup untuk anak-anak. Tandon air terbuat dari kotak anti air terletak di saluran daya/ power dan pipa pesat. Fitting elbow disisipkan diantara inlet pipa pesat dan pipa pipa pesat. Aliran pipa pesat dihentikan oleh tarikan kawat jadi inlet keluar dari air.



Sumbat pengering digunakan secara periodik untuk mengosongkan pasir dan daun atau benda lainnya yang dapat menyumbat. Ujung pipa dilubangi selanjutnya air masuk. Ukuran lubang sangat penting, jadi aliran tidak terhambat dan 50% daerah ujung permukaan pipa harus dibor dengan lubang yang luasnya 1cm

Gambar 15.7. Tandon Air

### 15.7. Komponen Generator Mikrohidro

Komponen Generator Mikrohidro terdiri atas :

- Rakitan Turbin- Generator
- *Pipa pesat adaptor flange*
- Katup
- *Gasket karet*
- Mur dan baut M24
- Kontrol panel termasuk pengatur beban listrik termasuk panel *electronic load controller*
- Ballast merupakan dummy-load.

Sistem terdiri dari dua komponen utama, yaitu turbin *Generator* dan *electronic load controller*. Komponen yang diperlukan dapat diperoleh di daerah setempat. Pipa pesat sebaiknya terbuat dari baja, dapat juga dipakai pipa pralon dengan kualitas terbaik dengan ketebalan tertentu.

Komponen tambahan yang harus ada mencakup :

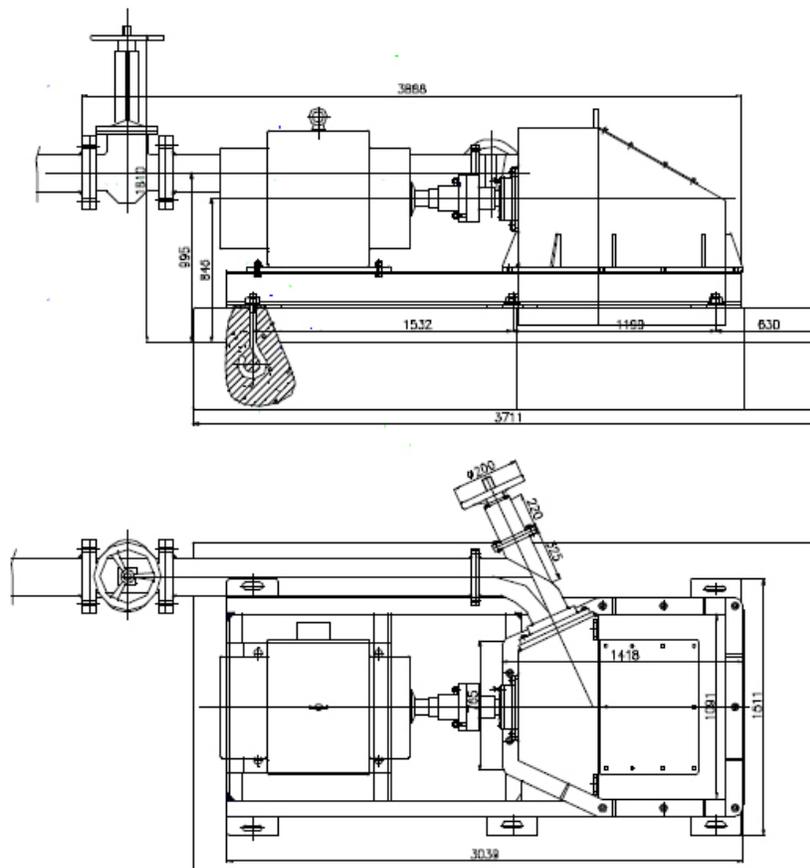
- Pipa baja dengan ketebalan 4mm, panjang 28-40m dan diameternya 150mm
- Kabel dari Generator ke konsumen.
- Pengawatan ke konsumen dengan kabel berisolasi jenis NYM

## 15.8. Instalasi Mikrohidro

### 15.8.1. Aspek Mekanik

Setelah menemukan lokasi yang sesuai kemudian pekerjaan sipil selesai, perangkat mikrohidro siap untuk dipasang. Lakukan ini seperti **gambar 15.8** :

- 1) Baut Turbin ke dudukan atau bagian dasar Turbin. Lakukan pembersihan dengan jarak antara Turbin dan tanah paling sedikit 500mm. Pembersihan seperti ini diperlukan untuk menjaga agar tidak ada percikan hitam yang akan mengganggu kinerja Turbin. Dudukan Turbin harus terbuat dari beton dengan 6 buah baut M24 menancap padanya.
- 2) Sisipkan katup gate ke *nozzle injector pipe followed* dengan menggunakan elbow~120° yang akan tersambung ke pipa pesat. Sudutnya bergantung dari kemiringan .



Gambar 15.8 Pemasangan Turbin dan Generator  
a) tampak samping b) tampak dari atas

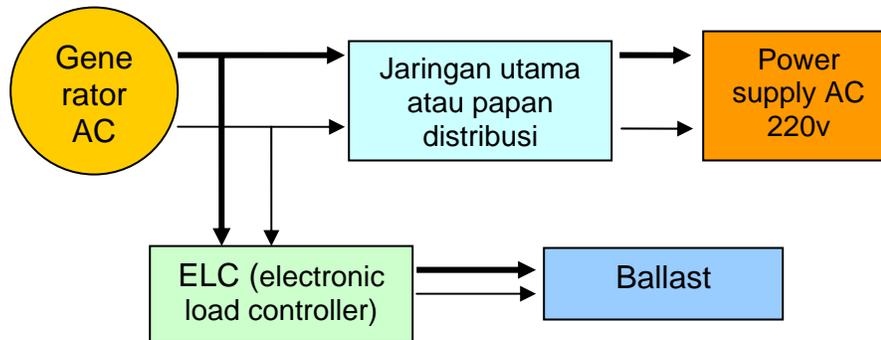
- 3) Tempelkan elbow 120° (atau yg lain) ke dinding foreway. Ini akan menempel dengan lubang angin/ ventilasi yang mengalirkan udara masuk dari pipa pesat. Saluran udara dibagian atas yang terbuka harus lebih besar daripada ketinggian air di bendungan. Alihkan air dari bendungan atau block pipa pipa pesat lainnya selama proses pemasangan berlangsung
- 4) Mulai memasang pipa pesat. Pemasangan dapat dimulai dari arah yang berbeda. Beberapa orang mungkin menginginkan pemasangan pipa pesat sebelum terpasang diantara kedua elbow.

### 15.8.2. Aspek Elektrik

Generator menggunakan magnet permanent, jenis sinkron. Beban dikendalikan oleh *electronic load controller (ELC)* yang terpasang pada kontrol box. ELC didesain untuk mempertahankan tegangan agar konstan dan frekuensi yang mendekati konstan dengan menjaga beban elektrik yang konstan pada Generator. Untuk melakukannya ELC menyambungkan daya yang bukan digunakan konsumen ke beban ballast pemanas udara dimana kelebihan energy dibakar dalam panas.

Dua beban ballast digunakan, satu yang utama dan satunya sebagai tambahan. Jumlah beban ballast utama 66% dari total, sedang beban ballast tambahan hanya 33%. Meskipun tidak diharuskan, ballast tambahan membiarkan Generator kerja pada temperatur yang rendah. Gelombang distorsi disebabkan oleh sambungan triac atau Thyristor menyebabkan Generator panas. Ini dapat dikurangi dengan meng-nolkan ballast, jadi tegangan yang menyebrang dari ballast akan memberi bentuk gelombang yang bagus. Disini ballast tambahan digunakan. Jika daya pada ballast utama boros melebihi batas, maka ballast tambahan secara otomatis tersambung dan saat daya turun dibawah batas yang diijinkan secara otomatis sambungan akan terlepas.

ELC dipasang parallel dengan output Generator, jadi dengan tidak sengaja akan memutuskan rangkaian. Hubungan sistem ***gambar 15.9*** sebagai berikut :

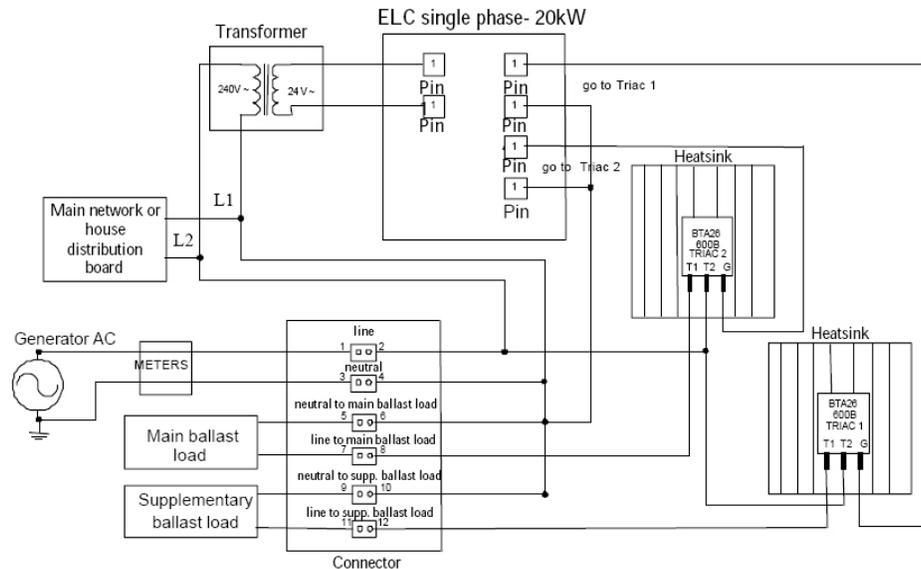


Gambar 15.9. Hubungan kontrol kelistrikan

Untuk menyambungkan komponen listrik, ikuti langkah berikut :

Hal yang berhubungan dengan listrik sebaiknya dipasang oleh orang yang kompeten dalam hal pengawatan pada keadaan bertegangan. Sistem penyambungannya dengan dasar netral. Netral dan phasa digabungkan ke element beban dalam waktu yang sangat cepat.

- 1 Pasang kontrol box di tempat yang terlindung dari hujan dan sinar matahari. mungkin salah satunya di powerhouse bersama Turbin atau ditempat lain, dirumah pemakai.
- 2 Bumikan (ground) Mikrohidro. Lakukan ini dengan menyisipkan salah satu ujung kawat Mikrohidro yang panjangnya 16mm dan ujung bahan logam atau tiang logam lainnya yang tidak jauh dari ground Mikrohidro
- 3 Sambungkan Generator dengan kontrol box. Semua pengawatan dari Generator ke kontrol box, dari kontrol box ke beban user dan dari kontrol box ke ballast harus sudah menggunakan kawat tembaga berisolasi multistranded, yang ukurannya lihat buku PUIL. Diagram pengawatan menunjukan semua lokasi penyambungan tapi catatan sebagian besar komponen sudah disambungkan ke kontrol panel
- 4 Sambungkan kabel beban user L1 dan L2 dengan kontrol box dan house
- 5 Sambungkan beban ballast utama dan tambahan ke kontrol box seperti yang ditunjukan. Gabungan (total) beban balas berkisar (max) 10-15% lebih besar dari output Generator. Sebagai contoh 11kW atau 12kW untuk 10kW Generator. Beban ballast utama akan berkisar 7kW atau 8kW ( $\pm 66\%$ ) sedang ballast tambahan berkisar 3kW atau 4kW ( $\pm 33\%$ ). Beban ballast menjadi panas, sampai  $100^{\circ}$  C. untuk pencegahan kerugian dan bahaya api, pasang ditempat yang aman.
- 6 Tutup pintu kontrol box. Sistem sekarang siap untuk pengoperasian yang pertama.



Gambar 15.10 Electronic Load Kollroller

## 15.9. Pengoperasian

- 1 Periksa saluran daya dan bendungan apakah terbebas dari puing-puing
- 2 Pastikan Turbin mati dan seluruh jalur supply aliran listrik mati. Switch di kontrol box harus dalam posisi "off"
- 3 Buka lebar-lebar katup spear dan katup gate. Biarkan katup gate selalu terbuka saat Turbin beroperasi dan hanya akan tertutup saat perbaikan Turbin
- 4 Isi bendungan dan biarkan air mengalir dengan bebas masuk ke dalam pipa pesat. Turbin akan berbutar dan air akan mengalir keluar dari Turbin (ke pengering).
- 5 Saat air mengalir, timbul energi listrik. Tegangan akan bertambah sampai Voltmeter di kontrol box membaca 230V. jika tegangan bertambah terus, sesuaikan aliran air dengan menggunakan katup spear jadi tegangan tetap pada 230V. setelah satu atau dua menit tegangan akan turun ke 220V

*Selalu putar handle katup dengan perlahan dan hati-hati untuk menghindari perubahan yang mendadak bagi tekanan air di pipa pesat. Perubahan mendadak di akibatkan efek air yang beradu dan pecahnya pipa pesat.*

- 6 Operasikan seperti ini selama 15 menit, sambil mengamati bila ada kebisingan yang aneh, temperature yang berlebih atau masalah lainnya. Dan jika OK gunakan switch pada pintu kontrol panel untuk menghubungkan daya ke pengguna.

- 7 Tegangan harus stabil saat beban hidup atau saat mati. Jika tegangan turun sampai 220V periksa kondisi aliran air. Tegangan perlu diperiksa dan disesuaikan jika ukuran aliran air berubah.

*Jangan biarkan terjadi hubungan elektrik menjadi basah. Gunakan tangan yang kering, hati-hati dengan Electrocution*

*Jangan menyumbat peralatan secara langsung ke Mikrohidro tanpa menggunakan beban yang terkontrol. Karena akan dihasilkan tegangan yang salah, yang akan merusak peralatan anda.*

- 8 Kapan saja ketika mematikan sistem, yang pertama tutup katup spear untuk menghentikan aliran air dan kemudian Voltmeter menunjuk ke 100V, switch di kontrol box diposisikan "off". Kemudian secara perlahan tutup katup spear dan tutup katup gate, untuk mematikan sistem

### 15.10. Perawatan Dan Perbaikan

Perawatan umum untuk Mikrohidro anda akan menambah umurnya. Ikuti petunjuk berikut. Sangat penting memasang Mikrohidro ditempat yang tidak berpotensi banjir. Perlindungan sederhana dengan menggunakan atap, diperlukan untuk melindungi Generator dari hujan atau dengan membangun gudang kecil yang dapat dikunci (lebih disukai). Jika didalam ruangan Generator menjadi lembab perlu untuk dilakukan pengeringan. Tidak akan timbul kerusakan permanent, tapi periksa bearing untuk melihat jika pada bearing terdapat air. Jangan coba untuk mengeringkannya dekat dengan api. Sebelum digunakan lagi, pastikan power socket juga kering. Pengembunan dalam Generator merupakan hal yang normal di daerah tropis dan tidak berpengaruh bagi kinerja Mikrohidro.

#### 15.10.1. Pelumasan Bearing

Mikrohidro memiliki dua bearing di Turbin yang harus diperiksa secara berkala. Satu dekat dengan bagian dalam casing Turbin dan yang satunya berada di shaft Turbin dekat Generator. Keduanya telah dilumasi di pabrik tapi memerlukan pelumasan kembali setiap 3 bulan sekali. Sebelum melakukan pelumasan, bersihkan *nipples* dan berikan pelumas extra dengan menggunakan semprotan pelumas. Turbine harus berhenti terlebih dulu sebelum dilumasi. Bearing Generator pilih yang jenis Free Maintenance *Tidak melumasi bearing secara tepat waktu dan mengurangi umur pakainya dan akan memerlukan penggantian. Bertambahnya gesekan juga akan mengurangi daya keluaran. Selalu bersihkan nipple sebelum melumasi.*

### 15.10.2. Mengganti Bearing dan Seal

Bagian dari pelumasan bearing, hanya ada dua pekerjaan yang harus diselesaikan terlebih dulu pada waktu yang teratur. Penggantian kedua bearing Turbin dan bearing seal setiap dua tahun. Ini biasanya tersedia di sebagian besar Negara, tapi jika ragu hubungi dealer anda. Untuk mengganti bearing dan seal, ikuti langkah berikut :

- 1 Matikan sistem kelistrikan
- 2 Tutup secara perlahan katup gate untuk menghentikan aliran air ke Turbin
- 3 Lepaskan kabel power dari Generator
- 4 Tunggu sampai tidak aliran menjadi kecil atau tidak ada aliran air keluar dan Turbin berhenti berputar
- 5 Lepaskan kopeling langsung antara shaft Turbin dengan shaft Generator
- 6 Lepaskan penggerak/ runner dari shaft Turbin
- 7 Lepaskan bearing yang dekat runner dengan menarik shaft Turbin kearah Generator
- 8 Lepaskan bearing yang dekat runner dengan menarik shaft Turbin kearah Generator
- 9 Untuk mengganti seal bearing, tekan casing bearing keluar dengan menggunakan tongkat baja yang pendek
- 10 Saat perakitan ulang, pastikan seluruh bagian terpasang ditempat yang tepat dan seluruh bautnya sudah terpasang kencang
- 11 Buka kembali katup gate dengan perlahan sampai aliran air kembali normal. Tunggu sampai dulu sebelum kabel disambungkan kembali dan sistem mulai kerja lagi.

### 15.10.3. Troubleshooting

Jika ada masalah yang terjadi, periksa bagian seperti dibawah ini:

1. *Kondisi ketinggian dan aliran terpenuhi, tapi Mikrohidro tidak kerja.* Itu berarti sistem tidak terpasang dengan benar. Periksa setiap langkah sekali lagi
2. *Untuk beberapa saat Mikrohidro sudah menghasilkan listrik dan kemudian aliran listriknya mati*

Jika petunjuk dari pedoman ini tidak diikuti dan penggunaan daya terlalu besar, atau jika terjadi hubung singkat fuse akan putus. Ini akan menghentikan aliran arus. Sangat penting untuk mengganti fuse dengan spesifikasi yang sama. Jika fuse putus dan diganti dengan yang ukurannya lebih besar, maka dimasa yang akan datang jadi berbahaya bagi Generator. Jika ini terjadi Generator memerlukan pengawatan yang baru dengan motor yang sudah sudah lama pengalamannya.

## Pembangkit Listrik Mikrohidro

3. Tegangan 220V dengan kondisi beban nol, tapi saat beban dipasang tegangan menjadi semakin turun

Telah terjadi beban berlebih, kurangi pemakaian beban. Untuk melihat apakah tegangan stabil dan apakah memiliki kotak kontrol, ujitlah dengan tukang listrik yang ahli.

4. Pengujian di kali menunjukkan bahwa Mikrohidro menghasilkan output yang baik (4.7kW sampai 16kW tergantung model). Setelah kerja beberapa saat diketahui output jadi berkurang

Resistansi kabel harus tepat, kabel panjang akan menghasilkan kehilangan output yang kecil. Hilangnya daya untuk panjang kabel 100m kurang lebih 10W. untuk jarak kawat memungkinkan untuk menambah diameter kabel

5. Daya keluaran baru- baru ini berkurang

Berkurangnya daya keluaran berarti menunjukkan putaran Turbin melambat dari pada biasanya. Pastikan ada cukup air yang masuk ke bendungan dan yakinkan sumber air memiliki aliran sesuai dengan yang diinginkan. Selain itu periksal bendungan dan pipa pesat, jika perlu saring dan bersihkan. Juga periksa bagian casing Turbin harus terbebas dari dedaunan atau kotoran lainnya dan bearing Turbin sudah cukup dilumasi.

### 15.11. Spesifikasi Teknik

Berikut ini dua model Mikrohidro, dengan daya berbeda kode A dan B yang berbeda kapasitas dayanya

	<b><u>Type A</u></b>	<b><u>Type B</u></b>
1 Daya keluaran	4.7kW to 8kW	9.4kW to 16kW
2 Beban maksimum	100%+15%	100%+15%
3 Tegangan	220V~	220V~
4 Frekuensi daya keuarant	50 Hz	50 Hz
5 Frekuensi pada kecepatan beroperasi	70 Hz	70 Hz
6 Kecepatan	1500rpm	1500rpm
7 Tinggi	1000mm	1000mm
8 Berat	80kg	100kg
9 Tipe Turbin	Turgo	Turgo
10 Diameter	270mm	270mm
11 Nomor emebr	20	20
12 Number pipa	1	2
13 Generator	Sinkron Magnet	Sinkron Magnet
14 Fuse	Sesuai ukuran	Sesuai ukuran
15 Ukuran bearing ujung Generator	SKF 46208	SKF 46208

16. Ukuran bearing ujung Turbin	SKF 46208	SKF 46208
17 Seal size 3	8x58x10mm	38x58x10mm
18 Kabel yg disarankan	16mm <sup>2</sup>	20mm <sup>2</sup>
19 Temperature	5 - 50 <sup>0</sup> C	5 - 50 <sup>0</sup> C
20 Kelembaban	0 - 90%	0 - 90%

**Catatan :**

Untuk menghasilkan daya keluaran sebesar 1.2 ialah dengan mengolah keluaran ketinggian dan kondisi aliran secara spesifik. Keluaran yang lebih besar mungkin dihasilkan bila ketinggian lebih besar atau aliran lebih cepat dari yang disarankan. Jika beban lebih besar menyebabkan kerusakan permanen pada stator.

**15.12. Rangkuman**

- Mikrohidro adalah pembangkit listrik skala kecil dengan ukuran puluhan KW sampai ratusan KW dengan memanfaatkan potensi air.
- Daya yang dibangkitkan sebanding dengan tinggi jatuh air dan besarnya debit air per detiknya.
- Komponen Mikrohidro terdiri atas: bendungan, pipa pesat, turbin air, generator, electronic load control, kabel listrik dari pembangkit ke pemakai.
- Pengukuran debit air dilakukan sepanjang waktu/ musin, baik musim hujan, musin kering untuk mengetahui potensi maksimum dan potensi minimumnya.
- Pemeliharaan dilakukan secara rutin, baik mekanik dengan memberikan pelumasan pada bearing, pada periode tertentu ganti bearing.

**15.13. Soal-soal**

1. Lokasi memiliki potensi untuk pemasangan Mikrohidro, tinggi jatuh airnya 20 meter, memiliki debit 20 liter/detik. Hitunglah berapa KW potensi terpasang listrik secara teoritik.
2. Gambarkan skematik diagram dari sejak tendon air sampai ke turbin air, jelaskan cara kerjanya.
3. Gambarkan skematik diagram hubungan generator, dengan *electronic load controller*, dummy load dan beban. Jelaskan cara kerjanya.

## Pembangkit Listrik Mikrohidro

---

4. Apa fungsi dipasang *dummy load* ? jika beban terpasang 50% apa yang terjadi pada *dummy load* dan jika beban terpasang 75%nya apa yang terjadi pada *dummy load*.
5. Jelaskan tatacara pengoperasian Mikrohidro saat pertama kali dihidupkan, dan jelaskan cara mematikan yang benar dan tepat.
6. Jelaskan pentingnya pemeliharaan Mikrohidro, baik pemeliharaan sisi turbin, sisi generator dan perangkat elektriknya.

## DAFTAR PUSTAKA

- 1 A R Bean, Lighting Fittings Performance and Design, Pergamou Press, Braunschweig, 1968
- 2 A.R. van C. Warrington, Protective Relays, 3<sup>rd</sup> 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 Benjamin Stein cs, Mechanical and Electrical Equipment for Buildings, 7<sup>th</sup> Edition Volume II, John Wiley & Sons, Canada, 1986
- 11 Bernhard Boehle cs, Switchgear Manual 8<sup>th</sup> edition, 1988
- 12 Brian Scaddam, The IEE Wiring Regulations Explained and Illustrated, 2<sup>nd</sup> Edition, Clags Ltd., England, 1994
- 13 Brian Scaddan, Instalasi Listrik Rumah Tangga, Penerbit Erlangga, 2003
- 14 By Terrell Croft cs, American Electrician's Handbook, 9<sup>th</sup> 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, 7<sup>th</sup> Edition, R. R. Dournalley & 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, Braunschweig, 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, Nourweg, 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 Elektrotechnik, 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, Nourweg, 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, 4<sup>th</sup> 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, 6<sup>th</sup> Edition, Metropolitan Book, New Delhi, 1984
- 48 Michael Neidle, Electrical Installation Technology, 3<sup>rd</sup> 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, 2<sup>nd</sup>, Verlag GmbH, Koln, 1998
- 53 Petruzella, 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 Tecnology, 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	$\Omega$	ohm
10	Hz	hertz
11	h	jam
12	min	menit
13	s	detik
14	n	jumlah putaran premenit
15	$\cos\phi$	faktor daya
16	$\phi$	sudut fase
17	$\lambda$	panjang gelombang
18	f	frekuensi
19	t	waktu
20	$t^{\circ}$	suhu
21	z	impedans

#### Awal Pada Satuan SI

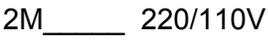
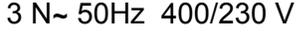
No.	Lambang	Keterangan
1	T	tera = $10^{12}$
2	G	giga = $10^9$
3	M	mega = $10^6$
4	K	kilo = $10^3$
5	m	mili = $10^3$
6	$\mu$	mikro = $10^6$
7	n	nano = $10^9$
8	p	piko = $10^{12}$

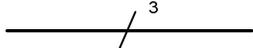
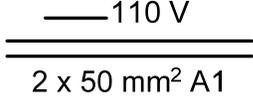
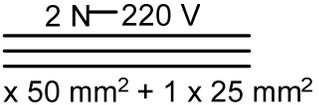
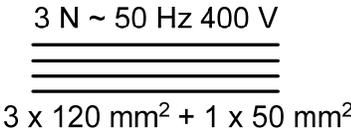
### Contoh Penggunaan Awalan Pada Satuan SI

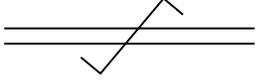
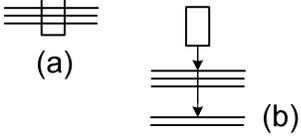
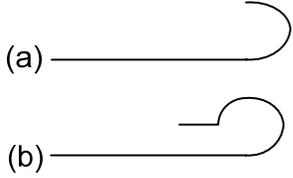
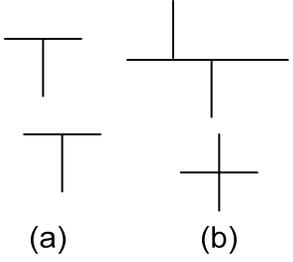
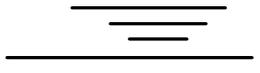
No.	Lambang	Keterangan
1	TΩ	1 teraohm = $10^{12}$ ohm
2	GW	1 gigawatt = $10^9$ W
3	MW	1 megawatt = $10^6$ W
4	kW	1 kilowatt = $10^3$ W
5	mV	1 milivolt = $10^3$ V
6	μA	1 mikroampere = $10^6$ A
7	nF	1 nanofarad = $10^9$ farad
8	pF	1 pikofarad = $10^{12}$ farad

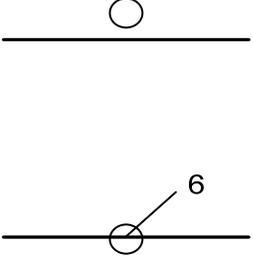
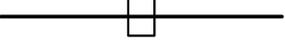
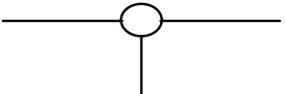
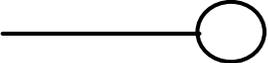
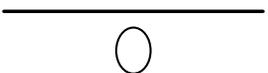
### b. Lambang Gambar Untuk Diagram

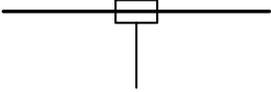
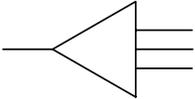
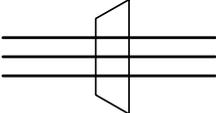
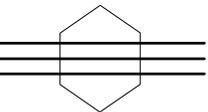
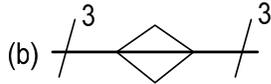
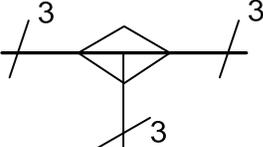
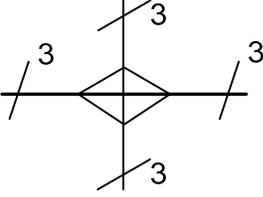
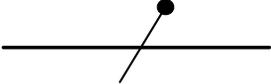
#### Lambang Gambar Untuk Diagram Saluran Arus Kuat

No	Lambang	keterangan
1	 atau 	Arus searah Catatan : Tegangan dapat ditunjukkan di sebelah kanan lambang dan jenis sistem di sebelah kiri.
2		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		Contoh : Arus bolak balik, 50 Hz.
5		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 Sirkuit
8		Catatan : a) Jika sebuah garis melambangkan sekelompok penghantar, maka jumlah penghantarnya ditunjukkan dengan menambah garis-garis pendek atau dengan satu garis pendek dan sebuah bilangan. Contoh : Tiga Penghantar (No.8 dan No.9)
9		b) Penjelasan tambahan dapat ditunjukkan sebagai berikut : 1) di atas garis: jenis arus, sistem distribusi, frekuensi dan tegangan. 2) Di bawah garis: jumlah penghantar sirkuit diikuti dengan tanda kali dan luas penampang setiap penghantar.
10		Contoh : Sirkuit arus searah, 110V, dua penghantar aluminium ver penampang 120 mm <sup>2</sup> .
11		Sirkuit arus searah, 220V (antara penghantar sisi dan kawat tengah 110V), dua penghantar sisi berpenampang 50 mm <sup>2</sup> dan kawat tengah 25 mm <sup>2</sup> .
12		Sirkuit fase tiga, 50Hz, 400 V, tiga penghantar berpenampang 120 mm <sup>2</sup> , dengan netral berpenampang 50 mm <sup>2</sup> .

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) Ujung penghantar atau kabel tidak dihubungkan. 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.            Catatan :            Jumlah pipa, luas penampang dan keterangan lainnya dapat diperlihatkan di atas saluran yang menggambarkan lintas pipa.            Contoh :            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.

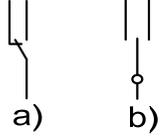
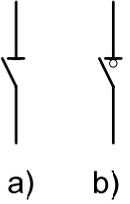
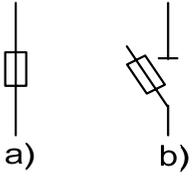
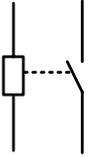
No	Lambang	keterangan
29		Penahan daya pada penyulang distribusi.
30		Titik injeksi penyulang daya.
31	<p>(a) </p> <p>(b) </p>	Kotak ujung kabel; mof ujung a) satu kabel berinti tiga b) tiga kabel berinti satu
32	<p>(a) </p> <p>(b) </p>	Kotak sambung lurus, mof sambung lurus, tiga penghantar. a) Dinyatakan dengan garis ganda. b) Dinyatakan dengan garis tunggal.
33		Kotak sambung cabang tiga.
34		Kotak sambung cabang empat.
35		Penghantar netral
36		Penghantar pengaman

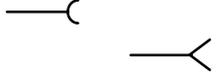
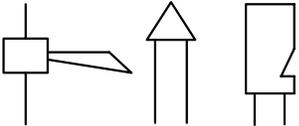
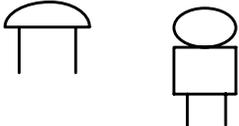
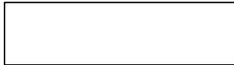
No	Lambang	keterangan
37		<p>Penghantar pengaman dan penghantar netral di gabung</p> <p>Contoh: Saluran fase tiga dengan penghantar pengaman dan penghantar netral</p>

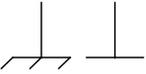
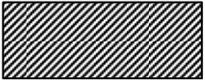
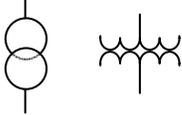
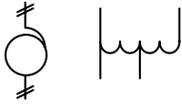
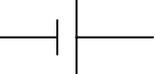
### c. Lambang Gambar Untuk Diagram Instalasi Pusat dan Gardu Listrik

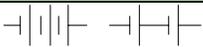
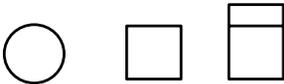
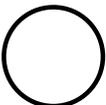
No.	Lambang	Keterangan
1	<p>a) b) c)</p>	<p>a) Sakelar penghubung b) Sakelar pemutus c) Sakelar berselungkup; saklar bersekat pelindung</p>
2	<p>a) b)</p>	<p>Sakelar dengan pemutusan :</p> <p>a) Secara termis b) Secara elektromagnetis</p>
3	<p>a) b)</p>	<p>Sakelar dengan pelayanan</p> <p>a) Relai termal b) Relai elektromagnetik</p>
4	<p>a) b)</p>	<p>a) Sakelar, lambang umum b) Sakelar kutub tiga</p>

No.	Lambang	Keterangan
5		a) Sakelar pengubah aliran

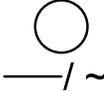
No.	Lambang	Keterangan
	 <p>a)      b)</p>	b) Sakelar pengubah aliran dengan kedudukan netral
6		Pemutus sirkit / CB (Circuit Breaker)
7	 <p>a)      b)</p>	Pemisah DS (Disconnecting Switch)
8		Pemutus daya LBS (Load Break Switch)
9		NFB (No Fuse Beaker) CB yang tak berwujud fuse
10	 <p>a)      b)</p>	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	 <p data-bbox="492 751 643 785">a)      b)</p>	<p>a) Lampu; lambang umum lampu isyarat</p> <p>b) Lampu kedip; indikator</p>
16	 <p data-bbox="435 1031 699 1058">a)      b)      c)</p>	<p>a) Klakson</p> <p>b) Sirene</p> <p>c) Peluit yang bekerja secara listrik</p>
17		Bel
18		Pendengung
19		Jalur terminal; blok terminal
20		Perangkat hubung bagi dan kendali
21		Bumi; pembumian

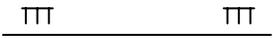
No.	Lambang	Keterangan
		
22		Hubungan rangka atau badan
23		Pembumian rangka
24		Penyekatan atau dielektrik
25		Sekat pelindung; selungkup Catatan - Penjelasan macam selungkup dapat ditambahkan dengan catatan atau dengan lambang kimiawi logam
26		Garis batas; garis pemisah; sumbu
27	  a)            b)	a) Generator - G b) Motor - M
28		Transformator
29		Auto transformator satu fase
30		Sel atau akumulator

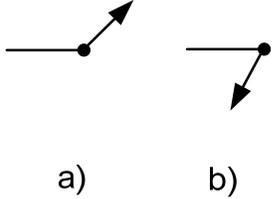
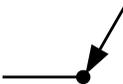
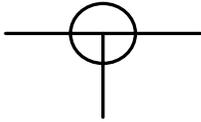
No.	Lambang	Keterangan
31		Baterai sel atau baterai akumulator
32	  a)            b)            c)	Lambang umum dari : a) Instrumen penunjuk langsung atau pesawat ukur b) Instrumen pencatat c) Instrumen penjumlah Contoh : a) Voltmeter b) Wattmeter c) Wh-meter d) (lihat Bagian 2.8.1)
33		Pusat tenaga listrik
34		Gardu listrik
35		Pusat listrik tenaga air
36		Pusat listrik tenaga termal (batubara, minyak bumi, gas, dsb)
37		Pusat tenaga nuklir

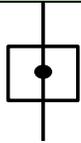
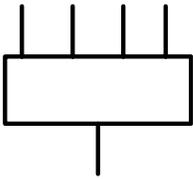
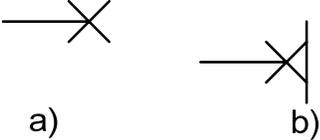
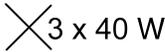
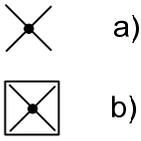
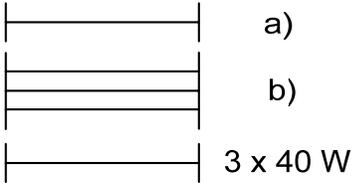
No.	Lambang	Keterangan
-----	---------	------------

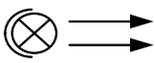
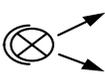
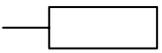
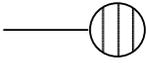
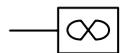
38		Pusat listrik panas bumi
39		Pusat listrik tenaga matahari
40		Pusat listrik tenaga angin
41		Pusat listrik plasma MHD ( <i>magneto-hydrodynamic</i> )
42		Gardu listrik konversi arus searah ke a.b.b

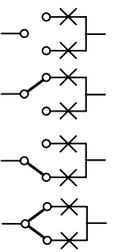
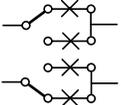
#### d. Lambang Gambar untuk Diagram Instalasi Bangunan

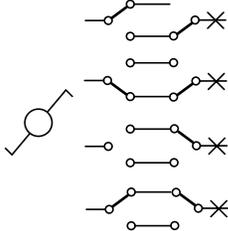
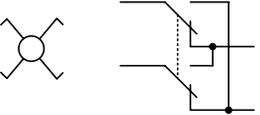
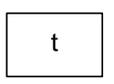
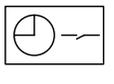
No.	Lambang	Keterangan
1		Pengawatan (lambang) Catatan - Untuk maksud tertentu, "garis" dapat diganti dengan "garis putus-putus"
2		Pengawatan tampak (di permukaan)
3		Pengawatan tidak tampak (di bawah permukaan)
4		Pengawatan dalam pipa

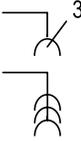
No.	Lambang	Keterangan
		Catatan-Jenis pipa dapat dinyatakan, jika perlu
5	 <p>a)                  b)</p>	a) Pengawatan menuju keatas b) Pengawatan menuju ke bawah Catatan: Lambang 5 & 6 1) pernyataan "ke atas" dan "ke bawah" hanya berlaku jika gambar dibaca dalam posisi yang benar 2) Panah pada garis 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	 <p>a)                      b)</p>	<p>a) Lampu; titik sadap lampu dengan pengawatannya</p> <p>b) Lampu dipasang tetap pada dinding dengan pengawatannya</p>
15		Kelompok dari tiga buah lampu 40 W
16		Perangkat lampu dengan sakelar sendiri
17	 <p>a)                      b)</p>	<p>a) Lampu darurat</p> <p>b) Armatur penerangan darurat</p>
18	 <p>a)                      b)</p> <p>3 x 40 W</p>	<p>a) Lampu floresen, lambang umum</p> <p>b) Kelompok dari tiga buah lampu floresen 40 W</p>

No.	Lambang	Keterangan
19		Proyektor, lambang umum
20		Lampu sorot
21		Lampu sebar
22		Lengkapan tambahan untuk lampu luah Catatan : Hanya digunakan jika perlengkapan 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 tertutup
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	NYFGbY
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)	NYRGbY, N2XSEYFGbY
H	Lapisan penghantar diatas isolasi, untuk membatasi medan listrik	NHKBA, NHKRA
K	Selubung timbal	NKBA, NAKBY
KL	Selubung alumunium	NKLY, NAKLY
KWK	Selubung dari pita tembaga yang terpasang dan dilas memanjang	NKWKZY

Code	Arti	Contoh
L	Perisai dari jalinan-kawat-baja-bulat (braid)	NTRLA
MK	Kabel dengan selubung timah hitam untuk pemasngan dalam kapal laut	MK
N	Kabel standar penghantar tembaga	NYA, NY Y
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	NKR RGbY
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 elektrostatik.....	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 elektrostatik Van de Graff .....	1-3
1.6	Model visual tegangan .....	1-4
1.7	Sumber tegangan DC Power supply .....	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 Kirchhoff-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 ekuivalen sumber tegangan.....	1-23
1.33	Rangkaian ekuivalen 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 permanet .....	2-2
2.3	Daerah netral pada magnet permanet.....	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 kapasitansi fungsi frekuensi .....	3-14
3.17	Nilai induktansi fungsi frekuensi.....	3-15
3.18	Bentuk gelombang tegangan dan arus beban Induktor .....	3-15
<b>3.19</b>	.....	<b>3-16</b>
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 fasa netral; tegangan fasa ke fasa .....	3-47
3.63	Pengukur Tegangan fasa-fasa, tegangan fasa-netral .....	3-48
3.64	Beban Bintang.....	3-48
3.65	Gelombang Sinusoida 3 fasa .....	3-49
3.66	Diagram Vektor Tegangan dan Arus 3 fasa .....	3-49
3.67	Vektor Tegangan dan Arus beban Resistif tidak seimbang.....	3-49
3.68	Vektor Tegangan fasa-netral, beban tidak seimbang.....	3-50
3.69	Hubungan Segitiga .....	3-50
3.70	Vektor Arus Segitiga.....	3-50
3.71	Vektor Arus fasa 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 fasa 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 induktif b) beban kapasitif.....	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

<b>Bab 5. Motor Listrik Arus Bolak Balik</b>	
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 kompond .....	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	Membalik 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 penyalan 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 Kompound.....	6-21
6.44	Karakteristik putaran Motor DC Kompound.....	6-22
6.45	Belitan Jangkar.....	6-22
6.46	Letak Sisi-sisi Kumparran 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 Otomatik .....	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	Trigering 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 90 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 $\frac{1}{2}$ Gelombang 3 Fasa .....	10-15
10.25	Penyearah $\frac{1}{2}$ Gelombang 3 Fasa Diode Terbalik .....	10-15
10.26	Urutan Kerja Penyearah Diode 3 Fasa $\frac{1}{2}$ Gelombang .....	10-16
10.27	Penyearah Jembatan Gelombang Penuh 3 Fasa .....	10-17
10.28	Bentuk Gelombang Penyearah Penuh 3 Fasa .....	10-17
10.29	Penyearah Terkendali $\frac{1}{2}$ Gelombang .....	10-19
10.30	Sudut Penyalaan dan Output Tegangan DC $\frac{1}{2}$ 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 Thyristor .....	10-20
10.34	Penyearah Thyristor dengan Diode .....	10-20
10.35	Grafik Fungsi Penyalaan Gate Thyristor .....	10-21
10.36	Penyearah Terkendali Jembatan 1 Fasa .....	10-21
10.37	Penyearah Thyristor $\frac{1}{2}$ Gelombang 3 Fasa .....	10-22
10.38	Grafik Pengaturan Sudut Penyalaan .....	10-23
10.39	Penyearah Terkendali 3 Fasa .....	10-23
10.40	Bentuk Tegangan DC Penyearah 3 Fasa .....	10-24
10.41	Urutan Penyalaan Gate-Thyristor 3 Fasa .....	10-24
10.42	Rangkaian Pembangkit Pulsa Chip TCA785 .....	10-25
10.43	Bentuk Gelombang Chip TCA785 .....	10-25
10.44	Rangkaian Daya 1 Fasa 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 Fasa .....	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 di beberapa 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	Pengamanan 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 (menggangu 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 praktek 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	SF6 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 <sup>0</sup> 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 pengenalan belitan Generator DC.....	6-11
Tabel 6.2 Rangkaian Motor-motor DC .....	6-19
Tabel 6.3 Hubungan Sisi Kumputan dengan Lamel Belitan Gelung.....	6-25
Tabel 6.4 Hubungan Sisi Kumputan 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 Indeks 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 penghantar 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 Controller.....	12-26
Tabel 12.4. Perbandingan jenis controller untuk masing-masing aplikasi .	12-27
Tabel 12.5. Parameter controller 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 978-979-060-084-3

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. 12.386,00