



TEKNIK PEMANFAATAN TENAGA LISTRIK JILID 3

untuk SMK

Prih sumardjati, dkk.



JILID 3

Prih Sumardjati, dkk.

# Teknik Pemanfaatan TENAGA LISTRIK

untuk  
Sekolah Menengah Kejuruan



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

Prih Sumardjati  
Sofian Yahya  
Ali Mashar

# TEKNIK PEMANFAATAN TENAGA LISTIK 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 PEMANFAATAN TENAGA LISTRIK JILID 3

Untuk SMK

Penulis Utama : Prih Sumardjati  
Sofian Yahya  
Ali Mashar  
Editor : Miftahu Soleh  
Perancang Kulit : Tim

Ukuran Buku : 18,2 x 25,7 cm

SUM SUMARDJATI, Prih  
t Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3 untuk SMK /oleh  
Prih Sumardjati, Sofian Yahya, Ali Mashar ---- Jakarta : Direktorat  
Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal  
Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen  
Pendidikan Nasional, 2008.  
xxiv. 155 hlm  
Daftar Pustaka : 509-511  
ISBN : 978-979-060-096-6

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 kehadiran 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, pada tahun 2008, telah melaksanakan penulisan pembelian hak cipta buku teks pelajaran ini dari penulis untuk disebarluaskan kepada masyarakat melalui *website* bagi siswa SMK.

Buku teks pelajaran ini telah melalui proses penilaian oleh Badan Standar Nasional Pendidikan sebagai buku teks pelajaran untuk SMK yang memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 12 tahun 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 di seluruh Indonesia.

Buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional tersebut, 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 ditayangkannya *softcopy* ini akan lebih memudahkan bagi masyarakat untuk mengaksesnya sehingga peserta didik dan pendidik di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri dapat memanfaatkan sumber belajar ini.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Selanjutnya, 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,  
Direktur Pembinaan SMK

## PENGANTAR

Sebagai jawaban terhadap kebutuhan dunia kerja, Pemerintah telah mengembangkan kurikulum Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) menjadi kurikulum berbasis kompetensi. Dengan kurikulum ini diharapkan SMK mampu menghasilkan lulusan-lulusan yang kompeten untuk menjadi tenaga kerja profesional di dunia kerja sehingga dapat meningkatkan taraf hidup sendiri maupun keluarga serta masyarakat dan bangsa Indonesia pada umumnya.

Kelompok Teknologi Bidang Teknik Listrik, yang merupakan salah satu bagian dari Kelompok Teknologi yang dikembangkan di lingkungan SMK, telah mengklasifikasikan lingkup kompetensinya menjadi empat Kurikulum Tingkat Satuan Pendidikan (KTSP), yaitu: (1) KTSP Pembangkit Tenaga Listrik, (2) KTSP Transmisi Tenaga Listrik, (3) KTSP Distribusi Tenaga Listrik, dan (4) KTSP Pemanfaatan Tenaga Listrik.

**KTSP Pembangkit Tenaga Listrik** meliputi sumber energi dan proses konversinya sampai menjadi energi listrik, **KTSP Transmisi Tenaga Listrik** menitikberatkan pada aspek pengiriman daya listrik dari pusat pembangkit sampai ke gardu distribusi, **KTSP Distribusi Tenaga Listrik** meliputi pendistribusian tenaga listrik dari gardu distribusi ke pusat-pusat beban, dan **KTSP Pemanfaatan Tenaga Listrik** mencakup ranah bagaimana listrik dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan para pemakainya yang dampaknya dapat dirasakan secara langsung.

Buku Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik ini disusun berdasarkan profil kompetensi KTSP Pemanfaatan Tenaga Listrik. Oleh karena itu, buku ini akan sangat membantu para siswa SMK Teknik Listrik dalam mengenal dan memahami teknik pemanfaatan tenaga listrik di industri maupun dalam kehidupan sehari-hari. 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 enam bab, yaitu: (1) Bahaya Listrik dan Sistem Pengamanannya, (2) Instalasi Listrik, (3) Peralatan Listrik Rumah Tangga, (4) Sistem Pengendalian, (5) Mesin-mesin Listrik, dan (6) PLC. Bab-bab yang termuat di dalam buku ini mempunyai keterkaitan antara satu dan lainnya yang akan membentuk lingkup pemahaman pemanfaatan tenaga listrik secara komprehensif, yang dapat dianalogikan sebagai suatu sistem industri, dimana tercakup aspek penyaluran tenaga listrik secara spesifik ke sistem penerangan dan beban-beban lain (Instalasi Listrik), pemanfaatan tenaga listrik untuk keperluan rumah tangga (Peralatan Listrik Rumah Tangga), penyediaan dan pemanfaatan tenaga listrik untuk sistem permesinan industri (Mesin-mesin Listrik) dan sarana pengendalian tenaga listrik yang dibutuhkan dalam proses produksi (Sistem Pengendalian dan PLC) serta pemahaman terhadap cara kerja yang aman di bidang kelistrikan (Bahaya Listrik dan Sistem Pengamanannya).

Jadi dengan buku ini diharapkan terbentuk pemahaman sistem pemanfaatan tenaga listrik secara komprehensif dan bisa menjadi sumber belajar bagi siswa SMK Teknik Listrik dan referensi bagi para guru pengampu KTSP Pemanfaatan Tenaga Listrik.

Terlepas dari itu semua, penulis menyadari bahwa dengan segala keterbatasan pada penulis, buku ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis harapan kritik dan saran masukan dari para pengguna buku ini, terutama para siswa dan guru SMK yang menjadi sasaran utamanya, untuk digunakan dalam perbaikannya pada waktu mendatang.

Penulis mengucapkan terima kasih dan menyampaikan rasa hormat kepada Direktur Pembinaan SMK, Kasubdit Pembelajaran, beserta staf atas kepercayaan dan kerjasamanya dalam penulisan buku ini serta semua pihak yang telah memberi dorongan semangat dan bantuannya baik langsung maupun tidak langsung atas tersusunnya buku ini. Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan dengan pahala yang berlipat ganda.

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

Bandung, Desember 2007

Penulis

## DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR .....	i
DAFTAR ISI .....	iii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xxiii
<b>1. BAHAYA LISTRIK DAN SISTEM PENGAMANANNYA .....</b>	<b>1</b>
1.1. Pendahuluan .....	1
1.2. Bahaya Listrik .....	1
1.3. Bahaya Listrik bagi Manusia .....	2
1.3.1. Dampak sengatan listrik bagi manusia .....	2
1.3.2. Tiga faktor penentu tingkat bahaya listrik .....	2
1.3.3. Proses Terjadinya Sengatan Listrik .....	4
1.3.4. Tiga faktor penentu keseriusan akibat sengatan listrik .....	4
1.3.5. Kondisi-kondisi Berbahaya .....	6
1.3.6. Sistem Pengamanan terhadap Bahaya Listrik .....	7
1.3.7. Alat Proteksi Otomatis .....	10
1.3.8. Pengaman pada peralatan portabel .....	12
1.3.9. Prosedur Keselamatan Umum .....	13
1.3.10. Prosedur Keselamatan Khusus .....	15
1.4. Bahaya Kebakaran dan Peledakan .....	17
1.4.1. Penyebab Kebakaran dan Pengamanan .....	17
1.5. Sistem – IP berdasarkan DIN VDE 0470 .....	20
<b>2. INSTALASI LISTRIK .....</b>	<b>22</b>
2.1. Pendahuluan .....	22
2.1.1. Sejarah Penyediaan Tenaga Listrik.....	23
2.1.2. Peranan Tenaga Listrik .....	24
2.1.3. Instalasi Penyediaan dan Pemanfaatan Tenaga Listrik .....	25
2.1.4. Jaringan Listrik .....	29
2.1.5. Alat Pengukur dan Pembatas (APP) .....	36
2.1.6. Panel Hubung Bagi (PHB) .....	43
2.1.7. Penghantar .....	49
2.1.8. Beban Listrik .....	52
2.1.9. Perhitungan Arus Beban .....	56
2.1.10. Bahan Kebutuhan Kerja Pemasangan Instalasi Listrik .....	57
2.2. Peraturan Instalasi Listrik .....	58
2.2.1. Sejarah Singkat .....	58
2.2.2. Maksud dan Tujuan PUIL-2000 .....	58
2.2.3. Ruang Lingkup .....	58

2.2.4.	Garis Besar Isi PUIL-2000 .....	58
2.2.5.	Peraturan Menteri .....	63
2.2.6.	Peraturan dan Undang-undang Lainnya .....	67
2.2.7.	Pemasangan Instalasi Listrik .....	69
2.3.	Macam-macam Instalasi .....	71
2.4.	Macam-macam Ruang Kerja Listrik .....	73
2.5.	Prinsip Dasar Instalasi Bangunan (IEC 364-1) .....	77
2.6.	Pencahayaan .....	79
2.6.1.	Sifat gelombang cahaya .....	79
2.6.2.	Pandangan Silau .....	80
2.6.3.	Satuan-satuan Teknik Pencahayaan .....	81
2.6.4.	Hukum Penerangan .....	83
2.6.5.	Penyebaran Cahaya .....	84
2.6.6.	Perancangan Penerangan Buatan .....	86
2.6.7.	Penggunaan Energi Untuk Pencahayaan Buatan.....	98
2.7.	Sejarah Perkembangan Sumber Cahaya .....	121
2.7.1.	Sumber Cahaya Dengan Lemak dan Minyak .....	121
2.7.2.	Sumber Cahaya Dengan Gas .....	123
2.7.3.	Lampu Busur .....	123
2.8.	Macam-macam Lampu Listrik .....	125
2.8.1.	Lampu Pijar .....	125
2.8.2.	Neon Sign (Lampu Tabung) .....	131
2.8.3.	Lampu Merkuri .....	137
2.8.4.	Lampu Sodium .....	141
2.9.	Kendali Lampu / Beban Lainnya .....	145
2.10.	Perancangan dan Pemasangan Pipa Pada Instalasi Listrik .....	155
2.10.1.	Pipa Union .....	155
2.10.2.	Pipa Paralon / PVC .....	156
2.10.3.	Pipa Fleksibel .....	156
2.10.4.	Tule / Selubung Pipa .....	156
2.10.5.	Klem / Sangkang .....	157
2.10.6.	Sambungan Pipa (Sock) .....	157
2.10.7.	Sambungan Siku .....	157
2.10.8.	Kotak Sambung .....	158
2.11.	Sistem Pentanahan .....	159
2.11.1.	Pendahuluan .....	159
2.11.2.	Pentanahan Netral Sistem .....	159
2.11.3.	Pentanahan Peralatan .....	162
2.11.4.	Elektroda Pentanahan dan Tahanan Pentanahan .....	167
2.11.5.	Jenis-Jenis Elektroda Pentanahan .....	167
2.11.6.	Tahanan Jenis Tanah .....	170
2.11.7.	Tahanan Pentanahan Berdasarkan Jenis dan Ukuran Elektroda .....	170
2.11.8.	Luas Penampang Elektroda Pentanahan .....	171
2.11.9.	Luas Penampang Hantaran Pengaman .....	172

2.12.	Pengujian Tahanan Pentanahan .....	174
2.12.1.	Pengukuran Tahanan Pentanahan (Earth Tester) .....	174
2.12.2.	Posisi Elektroda Bantu Dalam Pengukuran .....	176
2.12.3.	Pengukuran Tahanan Elektroda Pentanahan Menggunakan Metoda 62% .....	178
2.12.4.	Jarak Peletakan Elektroda Bantu .....	180
2.12.5.	Sistem Multi-Elektroda .....	181
2.12.6.	Metoda Pengukuran Dua-Titik (Metoda Penyederhanaan)..	182
2.12.7.	Pengukuran Kontinuitas .....	183
2.12.8.	Petunjuk-petunjuk teknis pengukuran .....	183
2.13.	Membuat Laporan Pengoperasian .....	187
2.14.	Gangguan Listrik .....	190
2.14.1.	Gejala Umum Gangguan Listrik .....	190
2.14.2.	Penyebab Gangguan .....	190
2.14.3.	Diagnosis Gangguan .....	190
2.14.4.	Mencari / Menemukan Gangguan .....	190
2.15.	Pemeliharaan / Perawatan .....	191
2.15.1.	Pemeliharaan Rutin .....	191
2.15.2.	Pemeliharaan Tanpa Jadwal / Mendadak .....	191
2.15.3.	Objek Pemeriksaan .....	192
2.15.4.	Pemeliharaan PHB – TR (Tegangan Rendah) .....	192
2.15.5.	Pemeliharaan Tiang .....	195
2.15.6.	Pemeliharaan Pembumian .....	195
2.15.7.	Contoh Identifikasi Gangguan Pada Pembumian Netral Pengaman .....	196
2.15.8.	Contoh Pengukuran dalam Pengujian Kontinuitas Pengantar .....	198
2.16.	Simbol-simbol Gambar Listrik .....	200
2.16.1.	Lambang Huruf Untuk Instrumen Ukur .....	200
2.16.2.	Lambang Gambar Untuk Diagram .....	201
2.16.3.	Lambang Gambar Untuk Diagram Instalasi Pusat dan Gardu Listrik .....	206
2.16.4.	Lambang Gambar untuk Diagram Instalasi Bangunan .....	212
2.16.5.	Nomenklatur Kabel .....	218
2.17.	Latihan Soal .....	221

### **3. PERALATAN LISTRIK RUMAH TANGGA ..... 222**

3.1.	Alat-Alat Laundry .....	222
3.1.1.	Seterika Listrik .....	222
3.1.2.	Mesin Cuci Pakaian .....	228
3.1.3.	Mesin Pengering Pakaian .....	236
3.1.4.	Mesin Cuci Piring .....	241
3.1.5.	Mesin Pembersih Vakum .....	246

3.2.	Alat-Alat Memasak .....	251
3.2.1.	Toaster .....	251
3.2.2.	Kompor Listrik .....	255
3.2.3.	Microwave Oven .....	262
3.3.	Alat-Alat Pemanas & Pendingin .....	267
3.3.1.	Pengering Rambut .....	267
3.3.2.	Kulkas dan Freezer .....	271
3.3.3.	Alat Pendingin Ruangan .....	277
3.3.4.	Alat Pemanas Air .....	283
<b>4.</b>	<b>SISTEM PENGENDALIAN .....</b>	<b>288</b>
4.1.	Sistem Pengendali Elektronik .....	291
4.1.1.	Pendahuluan .....	291
4.1.2.	Pengendali Tidak Kontinyu .....	291
4.1.3.	Pengendali Dua-Posisi .....	291
4.1.4.	Pengendali Kontinyu .....	293
4.1.5.	Pengendali Campuran.....	297
4.1.6.	Pengendali Elektronik .....	299
4.2.	Sistem Pengendali Elektronika Daya .....	304
4.2.1.	Pendahuluan .....	304
4.2.2.	Komponen Semikonduktor Daya .....	305
4.2.3.	Penyearah .....	312
4.2.4.	Pengendali Tegangan AC .....	323
4.2.5.	Kontrol Kecepatan dan Daya Motor Induksi Fasa Tiga .....	324
4.2.6.	Persiapan, Pengoperasian, dan Pemeriksaan Pengendali Elektronika Daya .....	327
4.3.	Sistem Pengendalian Motor .....	331
4.3.1.	Kontaktor Magnit .....	333
4.3.2.	Kontak Utama dan Kontak Bantu .....	334
4.3.3.	Kontaktor Magnit dengan Timer .....	335
4.3.4.	Rele Pengaman Arus Lebih (Thermal Overload Relay) .....	336
4.3.5.	Mengoperasikan dan Memelihara Sistem Pengendali Elektromagnetik .....	337
4.4.	Elektro Pneumatik .....	343
4.4.1.	Pendahuluan .....	343
4.4.2.	Simbol-Simbol .....	343
4.4.3.	Sistem Komponen .....	349
<b>5.</b>	<b>MESIN LISTRIK .....</b>	<b>353</b>
5.1.	Transformator Satu Fasa .....	356
5.1.1.	Konstruksi dan Prinsip Kerja .....	356
5.1.2.	Transformator Ideal .....	358

5.1.3.	Transformator Berbeban .....	360
5.1.4.	Pengujian Transformator .....	364
5.1.5.	Paralel Transformator .....	367
5.2.	Transformator Tiga Fasa .....	369
5.2.1.	Konstruksi Transformator .....	369
5.2.2.	Hubungan Transformator Tiga Fasa .....	373
5.2.3.	Pengujian Transformator Tiga Fasa .....	377
5.3.	Transformator Khusus .....	381
5.3.1.	Autotransformator .....	381
5.3.2.	Transformator Pengukuran .....	382
5.4.	Generator Arus Searah .....	384
5.4.1.	Konstruksi Mesin Arus Searah .....	384
5.4.2.	Tegangan Induksi .....	392
5.4.3.	Reaksi Jangkar .....	393
5.4.4.	Hubungan Generator Arus Searah .....	394
5.4.5.	Efisiensi .....	396
5.4.6.	Karakteristik Generator .....	397
5.5.	Motor Arus Searah .....	402
5.5.1.	Prinsip Dasar .....	402
5.5.2.	Persamaan Tegangan dan Daya .....	402
5.5.3.	Torsi .....	403
5.5.4.	Rugi-rugi Daya dan Efisiensi .....	404
5.5.5.	Macam-macam Hubungan Motor Arus Searah .....	404
5.5.6.	Karakteristik Motor Arus Searah .....	406
5.6.	Motor Induksi Tiga Fasa .....	408
5.6.1.	Konstruksi dan Prinsip Kerja .....	408
5.6.2.	Frekuensi dan Slip Rotor .....	413
5.6.3.	Rangkaian Ekuivalen .....	414
5.6.4.	Torsi dan Daya .....	416
5.6.5.	Penentuan Parameter Motor Induksi .....	420
5.6.6.	Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa .....	422
5.6.7.	Pemilihan Motor .....	425
5.7.	Generator Sinkron .....	427
5.7.1.	Pendahuluan .....	427
5.7.2.	Konstruksi .....	427
5.7.3.	Prinsip Kerja .....	433
5.7.4.	Alternator Tanpa Beban .....	435
5.7.5.	Alternator Berbeban .....	436
5.7.6.	Menentukan Resistansi dan Reaktansi .....	437
5.7.7.	Pengaturan Tegangan .....	439
5.7.8.	Kerja Paralel Alternator .....	442
5.8.	Motor Sinkron .....	444
5.8.1.	Prinsip Kerja .....	444
5.8.2.	Motor Saat Berbeban .....	445

5.8.3.	Daya Dihilangkan Motor Sinkron .....	446
5.8.4.	Efisiensi Motor Sinkron .....	447
5.8.5.	Kurva V Motor Sinkron .....	448
5.8.6.	Pengasutan Motor Sinkron .....	449
5.9.	Motor Satu Fasa .....	451
5.9.1.	Pendahuluan .....	451
5.9.2.	Motor Induksi Satu Fasa .....	452
5.9.3.	Motor Seri Satu Fasa (Universal) .....	464
5.10.	Generator Set .....	465
5.10.1.	Pendahuluan .....	465
5.10.2.	Mesin Diesel .....	466
5.10.3.	Mengoperasikan Generator Set .....	468
5.11.	Memperbaiki Motor Listrik .....	477
5.11.1.	Pendahuluan .....	477
5.11.2.	Perbaikan Dasar Motor Induksi .....	478
5.11.3.	Membongkar Kumputan Motor .....	480
5.11.4.	Pelilitan Kumputan Motor .....	481
5.11.5.	Laporan Pelaksanaan Pekerjaan .....	486

## **6. PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER ..... 487**

6.1.	Pendahuluan .....	487
6.1.1.	Sejarah Perkembangan PLC.....	488
6.1.2.	Keuntungan Penggunaan PLC .....	489
6.1.3.	Penggunaan PLC di Industri .....	489
6.2.	Konsep Logika .....	491
6.2.1.	Fungsi Logika .....	491
6.2.2.	Rangkaian PLC dan Simbolik Kontak Logika .....	494
6.3.	Arsitektur PLC .....	495
6.3.1.	Perangkat Keras .....	495
6.3.2.	Arsitektur Internal .....	496
6.4.	Pemrograman PLC .....	498
6.4.1.	Bahasa Pemograman PLC .....	498
6.4.2.	Operasi Pembacaan .....	499
6.4.3.	Instruksi Dasar PLC .....	500
6.4.4.	Pemograman dengan CX Programmer .....	503
6.4.5.	Contoh Program .....	505

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **RIWAYAT PENULIS**

## DAFTAR GAMBAR

1.1	Bahaya Primer Listrik .....	1
1.2	Bahaya Sekunder Listrik .....	2
1.3	Segitiga tegangan, arus, dan tahanan .....	3
1.4	Tubuh manusia bagian dari rangkaian .....	3
1.5	Sistem tegangan rendah di Indonesia .....	3
1.6	Jenis Bahaya Listrik .....	4
1.7	Reaksi Tubuh terhadap Sengatan Listrik .....	6
1.8	Contoh-contoh penyebab bahaya listrik .....	7
1.9	Pengamanan dengan isolasi pengaman .....	7
1.10	Pengamanan dengan pemagaran .....	7
1.11	Kondisi tegangan sentuh pada mesin .....	8
1.12	Saluran pentanahan sebagai pengaman terhadap tegangan sentuh ....	9
1.13	Pengawatan kabel pentanahan .....	10
1.14	Contoh pengaman otomatis .....	11
1.15	RCD/ELCB Fasa-Tiga .....	11
1.16	Contoh klasifikasi peng-amanan alat portabel .....	12
1.17	Contoh penggunaan alat listrik .....	13
1.18	Penggunaan tangga di daerah instalasi listrik .....	13
1.19	Inspeksi kondisi peralatan .....	13
1.20	Pemisahan si korban dari aliran listrik .....	14
1.21	Tindakan pertolongan pertama .....	14
1.22	Titik pemutusan aliran listrik .....	15
1.23	Penandaan alat yang diperbaiki .....	15
1.24	Tanda pekerjaan selesai .....	16
1.25	Bahaya Kebakaran dan Peledakan .....	17
1.26	Ukuran kabel .....	17
1.27	Pemakaian stop-kontak yang salah .....	18
1.28	Koneksi yang kendor .....	18
1.29	Lingkungan sangat berbahaya .....	18
1.30	Jenis Arus Kesalahan .....	19
2.1	Saluran energi listrik dari pembangkit ke pemakai .....	22
2.2	Generator .....	23
2.3	Penyaluran energi listrik ke beban .....	24
2.4	Distribusi Tenaga Listrik ke Konsumen .....	25
2.5	Instalasi Penyediaan dan Pemanfaatan Tenaga Listrik .....	25
2.6	Saluran penghantar udara untuk bangunan-bangunan kecil (menggangu keindahan pandangan) .....	30
2.7	Saluran kabel bawah tanah pada suatu perumahan elit .....	30
2.8	Situasi .....	32
2.9	Denah rumah tipe T-125 lantai dasar .....	33
2.10	Instalasi rumah tipe T-125 lantai dasar .....	34
2.11	Diagram satu garis instalasi listrik pada bangunan /gedung Tegangan Rendah .....	35
2.12	Diagram satu garis instalasi listrik pada bangunan /gedung sistem Tegangan Menengah dan Tegangan Rendah .....	36

2.13	Diagram satu garis sambungan tenaga listrik tegangan menengah .....	37
2.14	Kwh meter satu fasa analog dan digital .....	38
2.15	Kwh meter tiga fasa analog dan digital .....	38
2.16	Kwh meter tiga fasa dan KVARh .....	39
2.17	Rangkaian Kwh satu fasa dengan trafo arus .....	41
2.18	Rangkaian Kwh dua fasa dengan sambungan tetap .....	41
2.19	Rangkaian Kwh tiga fasa dengan trafo arus dan trafo tegangan .....	42
2.20	Contoh cubicle di ruang praktek POLBAN .....	45
2.21	MCB (Miniatur Circuit Breaker) .....	46
2.22	Moulded Case Circuit Breaker .....	47
2.23	ACB (Air Circuit Breaker) .....	47
2.24	OCB (Oil Circuit Breaker) .....	48
2.25	VCB (Vakum Circuit Breaker) .....	48
2.26	SF6 CB (Sulfur Hexafluoride Circuit Breaker) .....	49
2.27	Kabel NYA .....	50
2.28	Kabel NYM .....	50
2.29	Kabel NYY .....	50
2.30	Kabel N2XY .....	51
2.31	Kabel N2XY .....	51
2.32	Diagram Transmisi dan Distribusi .....	52
2.33	Rangkaian macam-macam Beban Sistem 3 fasa, 4 kawat .....	53
2.34	Macam-macam Stop Kontak .....	54
2.35	Piranti-piranti menggunakan motor .....	55
2.36	Diagram satu garis .....	56
2.37	Saluran instalasi bawah trotoar .....	71
2.38	Kelompok Gelombang Elektromagnetik .....	79
2.39	Warna-warna Spektrum .....	79
2.40	Energi – Panjang Gelombang – Lampu Pijar 500W .....	79
2.41	Grafik Kepekaan Mata .....	80
2.42	Pandangan Silau .....	80
2.43	Mata Manusia .....	80
2.44	Radian .....	81
2.45	Steradian .....	81
2.46	Lilin yang menyinari buku .....	81
2.47	Fluks Cahaya .....	82
2.48	Illuminansi .....	82
2.49	Hukum kebalikan kuadrat iluminasi .....	83
2.50	Kurva Cosinus .....	83
2.51	Jenis pantulan dan armatur .....	85
2.52	Sumber Cahaya diatas bidang kerja .....	90
2.53	Diagram Polar Intensitas Cahaya Lampu Pijar .....	90
2.54	Armatur Lampu Pijar .....	90
2.55	Diagram perhitungan dan optimasi daya listrik pada sistem pencahayaan buatan .....	111
2.56	Prosedur perencanaan teknis pencahayaan buatan .....	116
2.57	Membuat Api dari Gesekan Batu .....	121
2.58	Penerangan dengan Api .....	121
2.59	Api Lilin .....	122

2.60	Lampu Minyak .....	122
2.61	Lampu Minyak dengan Tekanan .....	122
2.62	Lampu Gas .....	123
2.63	Lampu Busur .....	123
2.64	Joseph Swan dan lampu percobaannya .....	126
2.65	Edison dan lampu percobaannya .....	126
2.66	Bohlam Bening .....	127
2.67	Bohlam Buram .....	128
2.68	Bohlam Lilin .....	128
2.69	Argenta .....	128
2.70	Superlux .....	129
2.71	Luster Bulat .....	129
2.72	Halogen .....	129
2.73	Halogen dengan reflektor .....	130
2.74	Lampu Tabung .....	131
2.75	Tahapan kerja lampu fluoresen .....	133
2.76	Gerakan elektron gas .....	133
2.77	Bentuk lampu hemat energi .....	134
2.78	Contoh Lampu Reklame .....	136
2.79	Lampu Merkuri .....	137
2.80	Rangkaian dasar lampu merkuri tekanan tinggi .....	138
2.81	Merkuri Reflector .....	139
2.82	Merkuri Blended .....	140
2.83	Lampu Metal Halide .....	140
2.84	Lampu SOX .....	141
2.85	Rangkaian dasar lampu sodium tekanan rendah .....	142
2.86	Lampu SON .....	143
2.87	Rangkaian dasar lampu sodium tekanan tinggi .....	144
2.88	Pemasangan saklar kutub tunggal dan sebuah stop kontak .....	146
2.89	Rangkaian saklar kutub ganda .....	147
2.90	Rangkaian saklar kutub tiga .....	148
2.91	Rangkaian Saklar Seri .....	149
2.92	Pemasangan Saklar kelompok .....	150
2.93	Pemasangan Sepasang Saklar Tukar .....	151
2.94	Pemasangan Sepasang Saklar Tukar dengan Penghantar Kabel .....	152
2.95	Pemasangan Saklar Silang dengan sepasang saklar tukar .....	153
2.96	Macam-macam Saklar Lampu .....	154
2.97	Pipa Union .....	155
2.98	Pipa Paralon / PVC .....	156
2.99	Pipa Fleksibel .....	156
2.100	Tule .....	156
2.101	Klem .....	157
2.102	Sambungan Pipa .....	157
2.103	Sambungan Siku .....	157
2.104	Kotak Sambung .....	158
2.105	Saluran Tanah dan Netral disatukan (TN-C) .....	160
2.106	Saluran Tanah dan Netral disatukan pada sebagian sistem (TN-C-S).....	161

2.107	Saluran Tanah dan Netral dipisah .....	161
2.108	Saluran Tanah Sistem dan Saluran Bagian Sistem Terpisah .....	162
2.109	Saluran tanah melalui impedansi .....	162
2.110	Tegangan sentuh tidak langsung .....	163
2.111	Tegangan sentuh dan tegangan langkah .....	164
2.112	Elektroda batang .....	168
2.113	Elektroda pita dalam beberapa konfigurasi .....	169
2.114	Elektroda Pelat .....	169
2.115	Pengukuran Metoda 3 Kutub .....	175
2.116	Pengukuran Metoda 2 Kutub .....	175
2.117	Prinsip pengukuran tahanan elektroda pengetanahan menggunakan metoda jatuh tegangan – 3 titik .....	176
2.118	Daerah resistansi efektif dari dua elektroda yang tumpang-tindih .....	177
2.119	Posisi elektroda Y di luar daerah resistansi efektif dari dua elektroda yang tidak tumpang-tindih .....	178
2.120	Pengukuran resistansi elektroda pengetanahan menggunakan Metoda 62% .....	178
2.121	Daerah resistansi efektif tumpang-tindih .....	179
2.122	Daerah pengukuran 62% .....	180
2.123	Sistem Multi-elektroda .....	181
2.124	Metoda pengukuran dua-titik .....	183
2.125	Pengukuran kontinuitas hantaran pengetanahan .....	183
2.126	Metoda pengukuran derau dalam sistem pengetanahan .....	184
2.127	Cara menetralkan noise dengan melilitkan kabel-kabel ukur secara bersama-sama .....	184
2.128	Cara menghindari noise dengan pengaturan rentangan kabel- kabel ukur .....	185
2.129	Pentralisiran noise menggunakan kabel perisai (shielded cables) .....	185
2.130	Cara mengatasi tahanan kontak antara elektroda dengan tanah sekitarnya .....	186
2.131	Penggunaan kawat kasa sebagai pengganti dari elektroda bantu.....	186
2.132	Kasus putusnya penghantar netral pada sistem PNP .....	196
2.133	Pengukuran resistansi kawat fasa, netral dan pembumian .....	199
2.134	Pengukuran resistansi kawat penghantar melingkar fasa dan netral .....	199
2.135	Pengukuran resistansi kawat penghantar melingkar fasa dan pembumian .....	199
3.1	Jenis-jenis seterika .....	222
3.2	Kabel daya .....	222
3.3	Jenis-jenis Elemen pemanas .....	223
3.4	Jenis-jenis alas seterika .....	223
3.5	Penutup dan pemberat .....	223
3.6	Knob dan pengatur suhu .....	224
3.7	Tangkai seterika .....	224
3.8	Ikhtisar bagian-bagian utama seterika .....	227
3.9	Mesin cuci pakaian .....	228
3.10	Motor dan beban pemberat .....	229

3.11	Sistem penyangga pulley .....	229
3.12	Sistem peredam getaran .....	230
3.13	Bagian belakang mesin dan katup solenoid .....	230
3.14	Piranti anti-siphon .....	231
3.15	Saluran masuk (inlet) air dan tempat limpahan air .....	231
3.16	Pompa dan saluran air .....	231
3.17	Pompa air .....	232
3.18	Saklar pemilih tipikal .....	232
3.19	Keadaan di dalam saklar .....	233
3.20	Mekanisme saklar pemilih .....	233
3.21	Saklar kontrol temperatur dan kecepatan .....	233
3.22	Gambaran saklar kontrol kecepatan dan temperatur .....	234
3.23	Kontrol ketinggian air .....	234
3.24	Mesin pengering pakaian .....	236
3.25	Sirkulasi udara di dalam mesin .....	237
3.26	Elemen pemanas .....	237
3.27	Lubang-lubang udara .....	237
3.28	Tumbler dan pintu .....	238
3.29	Lubang-lubang pada pintu dan slot besar .....	238
3.30	Screen kain dan saluran udara .....	238
3.31	Fan dan saluran buang .....	238
3.32	Flens .....	239
3.33	Bantalan .....	239
3.34	Saklar Siklus .....	239
3.35	Saklar siklus dilihat dari belakang .....	239
3.36	Motor saklar siklus .....	240
3.37	Panel kontrol panas .....	240
3.38	Sensor suhu .....	241
3.39	Mesin cuci piring .....	242
3.40	Mesin cuci piring dalam tatanan yang kompak .....	242
3.41	Saklar control tipikal .....	242
3.42	Tempat cuci piring konvensional .....	242
3.43	Mesin cuci tampak dalam .....	243
3.44	Contoh penyambungan ke kran sumber air .....	243
3.45	Sisi dalam mesin bagian atas .....	243
3.46	Bagian bawah mesin lengkap dengan rak .....	243
3.47	Bagian bawah mesinrak dilepas .....	244
3.48	Wadah garam .....	244
3.49	Proses di dalam mesin cuci .....	244
3.50	Pembersihan menggunakan pembersih vakum .....	246
3.51	Bagian-bagian utama mesin pembersih vakum .....	247
3.52	Jenis sikat putar .....	247
3.53	Contoh tas debu .....	248
3.54	Jenis-jenis perlengkapan pengisap .....	249
3.55	Pembersih vakum jenis berdiri .....	249
3.56	Prinsip kerja pembersih vakum basah/kering .....	249
3.57	Toaster .....	251
3.58	Elemen pemanas toaster .....	251

3.59	Slot tempat roti dilihat dari atas .....	252
3.60	Mekanisme penurunan toaster .....	252
3.61	Mekanisme penurun rak roti .....	252
3.62	Papan-papan rangkaian .....	253
3.63	Prinsip pemanasan pada kompor listrik .....	256
3.64	Kompor dengan elemen pemanas terbuka .....	257
3.65	Kompor listrik jenis dengan 4 piring panas (hot-plate) .....	258
3.66	Konstruksi hot plate .....	258
3.67	Kompor listrik jenis radiasi .....	258
3.68	Konfigurasi rangkaian elemen pemanas .....	259
3.69	Skema mekanisme kendali kompor listrik tipikal .....	259
3.70	Kompor induksi .....	260
3.71	Sistem kontrol .....	263
3.72	Daya masukan tegangan tinggi .....	263
3.73	Bagian tegangan tinggi .....	263
3.74	Microwave digital .....	264
3.75	Tombol-tombol fungsi microwave .....	264
3.76	Piring putar di ruang masak .....	265
3.77	Pemutar piring dan landasan putar .....	265
3.78	Elemen pemanas grill .....	265
3.79	Bagian dalam samping .....	265
3.80	Pengering rambut tipikal .....	267
3.81	Kipas angin pembangkit aliran udara .....	268
3.82	Saklar pengatur kecepatan motor .....	269
3.83	Elemen pemanas .....	269
3.84	Arah semburan udara melewati elemen pemanas .....	269
3.85	Isolasi dan penghalang protektif .....	270
3.86	Kulkas tipikal .....	272
3.87	Bagan kelengkapan kulkas .....	272
3.88	Siklus refrigerasi .....	274
3.89	Proses pendinginan .....	274
3.90	Freezer dan pengatur suhu .....	275
3.91	Koil kondensor .....	275
3.92	Ventilasi udara ruang kompresor .....	275
3.93	Ruang pendingin .....	276
3.94	Lubang pembuangan limbah air .....	276
3.95	Diagram pengkondisi udara (AC) .....	278
3.96	AC Jendela .....	279
3.97	AC jendela tampak dalam .....	279
3.98	Prinsip unit AC-Split .....	280
3.99	Unit kondensasi .....	280
3.100	Prinsip AC-chiller .....	281
3.101	Menara pendingin (cooling tower) tipikal .....	282
3.102	Alat pemanas air dengan tangki terbuka dan tangki tertutup .....	284
3.103	Bagian dalam tangki air .....	285
3.104	Alat pemanas air tunggal .....	286
4.1	Diagram kotak sistem kendali .....	288

4.2	Automatic Voltage Regulator (AVR) generator .....	290
4.3	Bilah-bimetal sebagai pengendali on-off .....	291
4.4	Zona netral .....	292
4.5	Aksi pengendali tiga posisi .....	292
4.6	Tanggapan step pengendali P .....	293
4.7	Diagram kotak pengendali P .....	293
4.8	Hubungan keluaran dan masukan pengendali Proporsional .....	294
4.9	Offset pengendali P .....	294
4.10	Diagram kotak pengendali I .....	295
4.11	Tanggapan pengendali I terhadap error step tetap .....	296
4.12	Laju perubahan keluaran terhadap error .....	296
4.13	Keluaran pengendali fungsi perubahan error .....	297
4.14	Diagram kotak pengendali D .....	297
4.15	Tanggapan step pengendali PI .....	298
4.16	Diagram kotak pengendali PI .....	298
4.17	Tanggapan step dan diagram kotak pengendali PID .....	298
4.18	Realisasi pengendali dua-posisi .....	299
4.19	Realisasi pengendali P .....	300
4.20	Realisasi pengendali I .....	300
2.21	Realisasi pengendali Diferensial .....	301
4.22	Realisasi pengendali PI .....	301
4.23	Realisasi pengendali PD .....	302
4.24	Implementasi pengendali PID .....	303
4.25	Ruang lingkup elektronika daya .....	304
4.26	Simbol dan konstruksi dioda .....	306
4.27	Karakteristik dioda .....	306
4.28	Simbol dan konstruksi thyristor .....	308
4.29	Karakteristik thyristor .....	308
4.30	Proteksi dari arus beban lebih: proteksi fasa dan proteksi cabang .....	310
4.31	Proteksi terhadap tegangan lebih .....	310
4.32	Dua komponen 4-lapis dihubungkan secara berlawanan .....	311
4.33	Komponen semikonduktor lima-lapis .....	311
4.34	Simbol dan karakteristik diac .....	311
4.35	Contoh diac .....	311
4.36	Simbol dan karakteristik Triac .....	312
4.37	Contoh spesifikasi triac .....	312
4.38	Ikhtisar penyearah dan simbol-simbolnya .....	313
4.39	Penyearah E1U .....	313
4.40	Penyearah B2U .....	315
4.41	Jenis tampilan rangkaian jembatan .....	315
4.42	Rangkaian penyearah M3U .....	316
4.43	Bentuk tegangan keluaran penyearah M3U .....	316
4.44	Penyearah B6U .....	317
4.45	Bentuk gelombang tegangan dan dioda-dioda yang konduksi .....	317
4.46	Penyearah E1C .....	319
4.47	Bentuk gelombang arus dan tegangan keluaran pada E1C .....	320
4.48	Dioda free-wheeling .....	320
4.49	Karakteristik pengaturan E1C .....	320

4.50	Penyearah B2C .....	321
4.51	Penyearah M3C .....	322
4.52	Penyearah B6C .....	322
4.53	Bentuk dasar pengendali tegangan AC .....	323
4.54	Skema kontrol kecepatan motor induksi dengan catu daya DC tegangan tetap .....	325
4.55	Skema kontrol kecepatan motor induksi dengan catu daya DC dan inverter PWM .....	325
4.56	Skema kontrol kecepatan motor induksi dengan catu daya AC dan inverter frekuensi variabel .....	325
4.57	Skema kontrol kecepatan motor induksi dengan catu daya AC dan inverter PWM .....	326
4.58	Diagram kotak sistem kontrol kecepatan motor induksi fasa tiga .....	326
4.59	Kendali motor manual .....	331
4.60	Kendali motor Semi otomatis .....	332
4.61	Kendali motor Semi otomatis .....	332
4.62	Kontaktor magnet .....	333
4.63	Simbol kontak magnet .....	333
4.64	Kontak Utama dan TOR .....	334
4.65	Kontak-kontak Bantu .....	334
4.66	Kontaktor Magnet dan Timer .....	335
4.67	Timer on Delay .....	335
4.68	Timer Off Delay .....	335
4.69	Kontaktor magnet dengan waktu tunda kombinasi hidup-mati .....	336
4.70	Kontaktor magnet dengan waktu tunda hidup-mati kontinyu .....	336
4.71	Konstruksi TOR .....	336
4.72	Permukaan TOR .....	336
4.73	Diagram kontrol dan diagram daya Pengendali motor langsung (Direct on line) .....	338
4.74	Diagram kontrol dan diagram daya Pengendali motor langsung dengan TOR .....	339
4.75	Diagram kontrol dan diagram daya Pengendali motor putar kanan-kiri .....	340
4.76	Diagram kontrol dan diagram daya pengendali starter motor dengan pengasutan Y – $\Delta$ .....	341
4.77	Diagram kontrol dan diagram daya Pengendali starter motor rotor lilit dengan pengasutan resistor .....	342
4.78	Contoh pemakaian 1 .....	348
4.79	Contoh pemakaian 2 .....	348
4.80	Contoh pemakaian 3 .....	349
4.81	Instalasi komponen Pneumatik .....	349
4.82	Instalasi Komponen Elektrik .....	350
4.83	Elemen-elemen Elektro-pneumatik .....	350
4.84	Pemrosesan sinyal .....	350
4.85	Rantai kontrol .....	350
4.86	Rangkaian komponen pneumatik 1 .....	351
4.87	Instalasi komponen pneumatik 2 .....	352
4.88	Instalasi komponen pneumatik 3 .....	352

5.1	Pembangkit Tenaga Listrik .....	353
5.2	Mesin CNC .....	353
5.3	Mesin Cuci .....	353
5.4	Alternator Mobil .....	354
5.5	Mesin Printer .....	354
5.6	Mesin ATM .....	354
5.7	Penggunaan Transformator pada Bidang Tenaga Listrik .....	355
5.8	Transformator Daya .....	355
5.9	Transformator Distribusi Tipe Tiang .....	355
5.10	Transformator pada Peralatan Elektronik .....	356
5.11	Percobaan Arus Induksi .....	356
5.12	Percobaan Induksi .....	356
5.13	Fluks Magnet Transformator .....	357
5.14	Transformator Tipe Inti .....	358
5.15	Tranformator Tipe Cangkang .....	358
5.16	Laminasi Inti Transformator .....	358
5.17	Transformator Tanpa Beban .....	359
5.18	Arus Tanpa Beban .....	359
5.19	Kurva B – H .....	360
5.20	Transformator Ideal .....	360
5.21	Transformator Berbeban .....	360
5.22	Rangkaian Ekuivalen Transformator .....	361
5.23	Rangkaian Ekuivalen dengan Acuan Sisi Primer .....	361
5.24	Rangkaian Ekuivalen dengan Acuan Sisi Primer disederhanakan .....	362
5.25	Rangkaian Ekuivalen dengan Acuan Sisi Sekunder .....	362
5.26	Transformator Faktor Daya "Lagging" .....	363
2.27	Transformator Faktor Daya "Leading" .....	363
2.28	Transformator Faktor Daya "Unity" .....	363
5.29	Rangkaian Percobaan Beban Nol .....	365
5.30	Rangkaian Ekuivalen Hasil Percobaan Beban Nol .....	365
5.31	Rangkaian Percobaan Hubung Singkat .....	366
5.32	Rangkaian Ekuivalen Hasil Percobaan Hubung Singkat .....	366
5.32	Penentuan Polaritas Transformator .....	366
5.33	Rangkaian Paralel Transformator Satu Fasa .....	367
5.34	Rangkaian Ekuivalen Paralel Transformator Satu Fasa .....	367
5.35	Diagram Vektor Paralel Transformator Satu Fasa .....	367
5.36	Rangkaian Paralel Transformator Satu Fasa Teg Sama .....	367
5.37	Rangkaian Ekuivalen Paralel Transformator Tegangan Sama .....	368
5.38	Diagram Vektor Paralel Transformator Tegangan Sama .....	368
5.39	Konstruksi Tranformator Tiga Fasa .....	369
5.40	Transformator Tipe Inti .....	369
5.41	Transformator Tipe Cangkang .....	370
5.42	Bushing Transformator .....	371
5.43	Alat Pernafasan .....	371
5.44	Tap Changer .....	371
5.45	Indikator Level Minyak .....	372
5.46	Indikator Temperatur .....	372

5.47	Relai Buchholz .....	372
5.48	Hubungan Bintang- bintang .....	373
5.49	Hubungan Segitiga – Segitiga .....	373
5.50	Hubungan Bintang – Segitiga .....	374
5.51	Hubungan Segitiga- Bintang .....	374
5.52	Transformator Tiga Fasa Hubung Zig-zag .....	375
5.53	Hubungan V-V atau Open □ .....	376
5.54	Hubungan Open Y - Open □ .....	376
5.55	Hubungan Scott atau T-T .....	377
5.56	Kelompok Hubungan Dy5 .....	379
5.57	Rangkaian Autotransformator .....	381
5.58	Transformator Arus .....	382
5.59	Transformator Tegangan .....	383
5.60	Konstruksi Mesin Arus Searah .....	384
5.61	Konstruksi Sikat Komutator .....	385
5.62	Proses Terbentuknya Ggl pada Sisi Kumparan Generator .....	386
5.63	Proses Penyearahan Tegangan pada Generator Arus Searah .....	387
5.64	Jangkar Generator Arus Searah .....	387
5.65	Lilitan Jangkar .....	388
5.66	Letak Sisi-sisi Kumparan dalam Alur .....	388
5.67	Prinsip Lilitan Gelung .....	389
5.68	Lilitan Gelung Tunggal .....	390
5.69	Prinsip Lilitan Gelombang .....	390
5.70	Lilitan Gelombang Tunggal .....	391
5.71	Fluks Medan Utama .....	393
5.72	Fluks Medan Jangkar .....	393
5.73	Reaksi Jangkar .....	393
5.74	Generator Penguat Terpisah .....	394
5.75	Generator Shunt .....	395
5.76	Generator Seri .....	395
5.77	Generator Kompon Panjang .....	396
5.78	Generator Kompon Pendek .....	396
5.79	Diagram Aliran Daya pada Generator Arus Searah .....	397
5.80	Rangkaian Generator Beban Nol .....	397
5.81	Rangkaian Generator Berbeban .....	398
5.82	Kurva Generator Arus Searah saat Dibebani .....	398
5.83	Percobaan Beban Nol Generator Penguat Sendiri .....	399
5.84	Resistansi Kritis Generator Shunt .....	399
5.85	Karakteristik Beban Nol pada Kecepatan Berbeda .....	400
5.86	Kurva Kecepatan Kritis .....	400
5.87	Contoh Karakteristik Beban Nol .....	400
5.88	Generator Arus Searah Shunt Berbeban .....	401
5.89	Prinsip Kerja Motor Arus Searah .....	402
5.90	Rangkaian Motor Arus Searah Penguat Terpisah .....	405
5.91	Rangkaian Motor Arus Searah Penguat Sendiri Shunt .....	405
5.92	Rangkaian Motor Arus Searah Penguat Sendiri Seri .....	405
5.93	Rangkaian Motor Arus Searah Kompon Panjang .....	405
5.94	Rangkaian Motor Arus Searah Kompon Pendek .....	406

5.95	Penampang Motor Induksi Tiga Fasa .....	408
5.96	Lilitan Motor Induksi .....	409
5.97	Rotor Sangkar .....	409
5.98	Rotor lilit .....	410
5.99	Nilai Arus Sesaat dan Posisi Flux .....	410
5.100	Proses Terjadinya Medan .....	412
5.101	Terjadinya Putaran pada Motor Induksi .....	413
5.102	Rangkaian Ekuivalen Rotor .....	414
5.103	Rangkaian Ekuivalen Motor .....	415
5.104	Rangkaian Ekuivalen dengan Refrensi Primer .....	415
5.105	Karakteristik Slip Vs Torsi .....	417
5.106	Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Rotor Lilit .....	417
5.107	Diagram Aliran Daya Motor Induksi Tiga Fasa .....	418
5.108	Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi .....	419
5.109	Rangkaian Ekuivalen dengan Refrensi Stator .....	420
5.110	Tes Tanpa Beban .....	421
5.111	Tes Hubung Singkat .....	422
5.112	Mengubah Jumlah Kutub .....	423
5.113	Pengaturan Tahanan Rotor Motor .....	424
5.114	Pengaturan Tegangan .....	424
5.115	Skema Pengaturan Frekuensi .....	425
5.116	Generator Sinkron Tiga Fasa dengan Penguatan Generator DC "Pilot Exciter" .....	428
5.117	Generator Sinkron Tiga Fasa dengan Sistem Penguatan "Brushless Exciter System" .....	428
5.118	Bentuk Rotor .....	429
5.119	Inti Stator dan Alur pada Stator .....	429
5.120	Belitan Satu Lapis Generator Sinkron Tiga Fasa .....	430
5.121	Urutan Fasa ABC .....	430
5.122	Belitan Berlapis Ganda Generator Sinkron Tiga Fasa .....	431
5.123	Diagram Phasor dari Tegangan Induksi Lilitan .....	432
5.124	Total Ggl Et dari Tiga Ggl Sinusoidal .....	432
5.125	Kisar Kumparan .....	432
5.126	Vektor Tegangan Lilitan .....	433
5.127	Diagram Generator AC Satu Fasa Dua Kutub .....	434
5.128	Diagram Generator AC Tiga Fasa Dua Kutub .....	435
5.129	Kurva dan Rangkaian Ekuivalen Alternator Tanpa Beban .....	436
5.130	Kondisi Reaksi Jangkar .....	436
5.131	Vektor Diagram dari Beban Alternator .....	437
5.132	Rangkaian Test Alternator Tanpa Beban .....	438
5.133	Rangkaian Test Alternator di Hubung Singkat .....	438
5.134	Karakteristik Tanpa Beban dan Hubung Singkat sebuah Alternator ....	438
5.135	Pengukuran Resistansi DC .....	439
5.136	Vektor Diagram Pf "Lagging" .....	439
5.137	Vektor Arus Medan .....	440
5.138	Karakteristik Beban Nol, Hubung Singkat, dan Vektor Arus Medan ....	440
5.139	Diagram Potier .....	441
5.140	Vektor Diagram Potier .....	442

5.141	Rangkaian Paralel Alternator .....	443
5.142	Rangkaian Lampu Berputar .....	443
5.143	Sychroscope .....	444
5.144	Motor Sinkron dua Kutub .....	444
5.145	Pengaruh Beban pada Kutub Rotor Motor Sinkron .....	445
5.146	Pengaruh Kenaikan Beban Pada Arus Jangkar .....	445
5.147	Vektor Diagram untuk Menentukan Daya Motor .....	446
5.148	Diagram Aliran Daya pada Sebuah Motor Sinkron .....	447
5.149	Diagram Vektor dalam Keadaan Beban Tetap, dengan Faktor Daya Berbeda .....	448
5.150	Kurva V Motor Sinkron .....	449
5.151	Food Processor .....	451
5.152	Mixer .....	451
5.153	Pod Coffee Makers Induksi Satu Fasa .....	451
5.154	Letak Kumparan Motor .....	452
5.155	Putaran Fluksi .....	453
5.156	Bentuk Gelombang Fluksi .....	454
5.157	Lengkung Torsi Motor Induksi Satu Fasa .....	455
5.158	Kumparan Bantu Motor Induksi Satu Fasa .....	455
5.159	Rangkaian Pengganti tanpa Rugi Inti .....	456
5.160	Rangkaian Pengganti dengan Rugi Inti (rc Paralel) .....	456
5.161	Rangkaian Pengganti dengan Rugi Inti (rc Seri) .....	457
5.162	Motor Split Phase .....	458
5.163	Motor Kapasitor .....	459
5.164	Motor Capacitor-Start .....	460
5.165	Motor Capacitor-Run .....	461
5.166	Motor Capacitor-Start Capacitor-Run .....	462
5.167	Motor Shaded-Pole .....	462
5.168	Konstruksi Motor Universal .....	464
5.169	Jangkar Motor Universal .....	464
5.170	Contoh Generator Set .....	465
5.171	Prinsip Kerja Mesin Diesel .....	466
5.172	Bagian-bagian Utama Generator Set .....	468
5.173	Fuel Filters (Wire-element Type) .....	471
5.174	Fuel Filters (Paper Element Type) .....	471
5.175	Pompa Injeksi Bahan Bakar .....	471
5.176	Pemeriksaan Minyak Pelumas .....	472
5.177	Pemeriksaan Sistem Pendingin .....	472
5.178	Pemeriksaan Baterai .....	473
5.179	Menguji Poros Motor .....	478
5.180	Pengujian Belitan Stator Dengan AVO Meter .....	479
5.181	Melepas Mur Tutup Rangka Motor .....	479
5.182	Melepas Penutup Motor dengan Treker .....	479
5.183	Melepas Penutup Motor dengan Palu .....	479
5.184	Memisahkan Bagian Rotor dari Rangka Motor .....	480
5.185	Pemeriksaan Belitan Stator dengan Megger .....	480
5.186	Pemotongan Kawat Kumparan .....	481
5.187	Hubungan Kumparan .....	482

5.188	Hubungan Kumparan 4 (Empat) Kutub .....	483
5.189	Bentangan Kumparan Motor Induksi 3 Fasa, 4 Kutub .....	483
5.190	Penyekatan Alur .....	484
5.191	Melilit Kumparan Langsung .....	484
5.192	Contoh Mal untuk Melilit Kumparan .....	484
5.193	Cara Lilitan Pental .....	485
5.194	Memasang Kumparan pada Alur .....	485
6.1	Ilustrasi Konseptual Aplikasi PLC .....	487
6.2	Contoh PLC .....	487
6.3	Standardisasi Bahasa Pemrograman PLC .....	488
6.4	Gerbang AND .....	491
6.5	Gerbang AND dengan 2 Masukan dan Tabel Kebenaran .....	491
6.6	Contoh Aplikasi Gerbang AND .....	491
6.7	Gerbang OR .....	492
6.8	Gerbang OR dengan 2 Masukan dan Tabel Kebenaran .....	492
6.9	Contoh Aplikasi Gerbang OR .....	492
6.10	Gerbang OR dan Tabel Kebenaran .....	492
6.11	Contoh Aplikasi Gerbang NOT .....	493
6.12	Contoh Aplikasi Gerbang NOT .....	493
6.13	Gerbang NAND .....	494
6.14	Gerbang NOR .....	494
6.15	Contoh Rangkaian dengan Logika Hardwired dan Diagram Tangga PLC .....	494
6.16	Sistem PLC .....	495
6.17	Arsitektur PLC .....	496
6.18	Komponen Utama CPU .....	497
6.19	Bahasa Pemrograman Menurut Standar IEC .....	499
6.20	Operasi Pembacaan .....	499
6.21	Ilustrasi Proses Beberapa Eksekusi Relai pada Diagram Tangga .....	500
6.22	Simbol Load (LD) .....	500
6.23	Simbol Load Not (LDNOT) .....	500
6.24	Simbol And .....	501
6.25	Simbol OR .....	501
6.26	Simbol OR NOT .....	501
6.27	Simbol OUT .....	501
6.28	Instruksi Out Not .....	501
6.29	Instruksi Timer .....	501
6.30	Instruksi Counter .....	502
6.31	Instruksi Move .....	502
6.32	Instruksi Compare .....	502
6.33	Instruksi Less Than .....	502
6.34	Instruksi Greater Than .....	502
6.35	Instruksi End .....	502
6.36	Menu Utama CX-Programmer .....	503
6.37	CX-Programmer New Project .....	504
6.38	Select Serial Port .....	505
6.39	Pengisian dan Pengosongan Tangki Air .....	505

6.40	Diagram Tangga Pengisian dan Pengosongan Tangki Air .....	506
6.41	Pengepakan Buah Apel .....	507
6.42	Diagram Tangga Pengepakan Buah Apel .....	508

## DAFTAR TABEL

<i>Tabel 2.1 Daya Tersambung Pada Tegangan Menengah</i> .....	26
<i>Tabel 2.2 Golongan Pelanggan PT. PLN</i> .....	27
<i>Tabel 2.3 Standarisasi Daya Pelanggan TM Dengan Pembatas Pelabur TM</i> .....	28
<i>Tabel 2.4 Standarisasi Daya Pelanggan TM Dengan Pembatas Pelabur TR</i> .....	28
<i>Tabel 2.5 Golongan Tarif</i> .....	29
<i>Tabel 2.6 Standar Daya PLN</i> .....	43
<i>Tabel 2.7 Daftar bahan untuk pemasangan instalasi listrik rumah tinggal</i> .....	57
<i>Tabel 2.8 Panjang Gelombang</i> .....	79
<i>Tabel 2.9 Daftar Efikasi Lampu</i> .....	83
<i>Tabel 2.10 Perhitungan Intensitas Penerangan</i> .....	83
<i>Tabel 2.11 Tingkat Pencahayaan</i> .....	86
<i>Tabel 2.12 Tingkat Pencahayaan Minimum Yang Direkomendasikan dan Renderasi Warna</i> .....	87
<i>Tabel 2.13 Efisiensi Armatur Penerangan Langsung</i> .....	92
<i>Tabel 2.14 Efisiensi Armatur Penerangan Sebagian Besar Langsung</i> .....	93
<i>Tabel 2.15 Efisiensi Armatur Langsung Tak Langsung</i> .....	94
<i>Tabel 2.16 Efisiensi Armatur</i> .....	95
<i>Tabel 2.17 Efisiensi Armatur Penerangan Tak Langsung</i> .....	96
<i>Tabel 2.18 Intensitas Penerangan</i> .....	98
<i>Tabel 2.19 Konsumsi Daya Listrik Lampu</i> .....	99
<i>Tabel 2.20 Temperatur Warna Yang Direkomendasikan Untuk Berbagai Fungsi/Jenis Ruang</i> .....	101
<i>Tabel 2.21 Fluks Cahaya dan Efikasi Lampu</i> .....	103
<i>Tabel 2.22 Contoh Jenis Lampu Yang Dianjurkan Untuk Berbagai Fungsi/Jenis Bangunan</i> .....	105
<i>Tabel 2.23 Daya Listrik Maksimum untuk Pencahayaan yang Diijinkan</i> .....	108
<i>Tabel 2.24 Daya Pencahayaan Maksimum Untuk Tempat Di Luar Lokasi Bangunan Gedung</i> .....	109
<i>Tabel 2.25 Daya Pencahayaan Maksimum Untuk Jalan dan Lapangan</i> .....	109
<i>Tabel 2.26 Tingkat Pencahayaan Minimum Yang Direkomendasikan dan Renderasi Warna</i> .....	111
<i>Tabel 2.27 Ikhtisar Illuminasi Untuk Beberapa Jenis Gedung</i> .....	117
<i>Tabel 2.28 Karakteristik Lampu Halogen</i> .....	130
<i>Tabel 2.29 Warna Cahaya Lampu Tabung</i> .....	131
<i>Tabel 2.30 Kemampuan tabung dialiri arus listrik</i> .....	135

<i>Tabel 2.31 Jenis Lampu Merkuri</i> .....	138
<i>Tabel 2.32 Karakteristik Lampu Merkuri Tekanan Tinggi</i> .....	138
<i>Tabel 2.33 Data Lampu Merkuri Flouresen</i> .....	139
<i>Tabel 2.34 Daya Lampu Merkuri Blended</i> .....	140
<i>Tabel 2.35 Karakteristik Lampu Sodium Tekanan Rendah</i> .....	142
<i>Tabel 2.36 Karakteristik Lampu Sodium Tekanan Tinggi</i> .....	143
<i>Tabel 2.37 Kondisi Lampu Saklar Seri</i> .....	149
<i>Tabel 2.38 Kondisi Lampu Saklar Kelompok</i> .....	150
<i>Tabel 2.39 Kondisi Lampu Saklar Tukar I</i> .....	151
<i>Tabel 2.40 Kondisi Lampu Saklar Tukar II</i> .....	152
<i>Tabel 2.41 Kondisi Lampu Saklar Silang</i> .....	153
<i>Tabel 2.42 Besar Tegangan Sentuh dan Waktu Pemutusan Maksimum</i> .....	165
<i>Tabel 2.43 Tegangan Langkah dan Waktu Pemutusan Gangguan Maksimum Yang Diizinkan</i> .....	166
<i>Tabel 2.44 Tahanan Jenis Tanah</i> .....	170
<i>Tabel 2.45 Tahanan Pengetanahan Pada Jenis Tanah Dengan Tahanan Jenis P1=100 Ohm-Meter</i> .....	171
<i>Tabel 2.46 Luas Penampang Minimum Elektroda Pengetanahan</i> .....	171
<i>Tabel 2.47 Luas Penampang Minimum Hantaran Pengaman</i> .....	172
<i>Tabel 2.48 Jarak Elektroda-Elektroda Bantu Menggunakan Metoda 62% (Ft)</i> .....	180
<i>Tabel 2.49 Sistem Multi-Elektroda</i> .....	182
<i>Tabel 2.50 Contoh Identifikasi Jenis Gangguan Peralatan Instalasi Listrik TR Pada Gedung</i> .....	193
<i>Tabel 2.51 Contoh Identifikasi Jenis Gangguan Peralatan Instalasi Listrik TM Pada Gedung</i> .....	194
<i>Tabel 2.52 Contoh Pengukuran Dalam Pengujian Kontinuitas Penghantar</i> .....	198
<i>Tabel 3.1 Daya Kompur Listrik</i> .....	258
<i>Tabel 4.1 Ikhtisar Penyearah</i> .....	318
<i>Tabel 5.1 Parameter Pengujian Beban Nol</i> .....	378
<i>Tabel 5.2 Parameter Pengujian Hub Singkat</i> .....	378
<i>Tabel 5.3 Kelompok Hubungan Menurut Standar Vde 0532</i> .....	380
<i>Tabel 5.4 Hubungan Sisi Kumparan Dengan Lamel Lilitan Gelung</i> .....	389
<i>Tabel 5.5 Hubungan Sisi Kumparan dengan Lamel Lilitan Gelombang</i> .....	391
<i>Tabel 5.6 Karakteristik Torsi Motor Induksi</i> .....	426
<i>Tabel 5.7 Klasifikasi Isolasi Motor</i> .....	426
<i>Tabel 5.8 Karakteristik dan Penggunaan Motor Induksi Satu Fasa</i> .....	463
<i>Tabel 5.9 Pelacakan Gangguan pada Genset</i> .....	476
<i>Tabel 6.1 Bagian dan Fungsi CX – Programmer</i> .....	504



## 5. MESIN LISTRIK

Prinsip dasar dari sebuah mesin listrik adalah konversi energi elektromekanik, yaitu konversi dari energi listrik ke energi mekanik atau sebaliknya dari energi mekanik ke energi listrik. Alat yang dapat mengubah (mengkonversi) energi mekanik ke energi listrik disebut generator, dan apabila mesin melakukan proses konversi sebaliknya yaitu dari energi listrik ke energi mekanik disebut motor.

Selain generator dan motor, transformator juga termasuk alat listrik yang menjadi bahasan pada saat mempelajari mesin, meskipun energi yang masuk dan yang keluar dari transformator sama yaitu energi listrik. Pada transformator energi listrik yang diberikan pada lilitan akan mengakibatkan timbulnya medan magnet pada inti besi dan selanjutnya diubah kembali menjadi energi listrik.

Mesin listrik mulai dikenal tahun 1831 dengan adanya penemuan oleh Michael Faraday mengenai induksi elektromagnetik yang menjadi prinsip kerja motor listrik. Percobaan mengenai konsep mesin listrik di laboratorium-laboratorium terus dilakukan sampai tahun 1870 saat *Thomas Alfa Edison* memulai pengembangan generator arus searah secara komersial untuk mendukung distribusi tenaga listrik yang berguna bagi penempatan listrik di rumah-rumah.

Kejadian yang penting dalam sejarah mesin listrik adalah dengan dipatentkannya motor induksi tiga fasa oleh *Nikola Tesla* pada tahun 1888. Konsep Tesla mengenai arus bolak-balik selanjutnya dikembangkan oleh *Charles Steinmetz* pada dekade berikutnya, sehingga pada tahun 1890 transformator dapat diwujudkan, sekaligus menjadi pembuka jalan untuk melakukan transmisi daya listrik jarak jauh.



Gambar 5.1 Pembangkit Tenaga Listrik



Gambar 5.2 Mesin CNC



Gambar 5.3 Mesin Cuci

Meskipun konsep mesin listrik yang digunakan saat ini tidak berbeda dari sebelumnya, tetapi perbaikan dan proses pengembangan tidak berhenti. Pengembangan bahan *ferromagnetic* dan isolasi terus dilakukan untuk meningkatkan kemampuan daya yang lebih besar dibandingkan dengan mesin listrik yang digunakan sekarang ini.

Mesin listrik memegang peranan yang sangat penting dalam industri maupun dalam kehidupan sehari-hari. Pada *power plant* digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik, di industri digunakan sebagai penggerak peralatan mekanik, seperti mesin pembuat tekstil, pembuat baja, dan mesin pembuat kertas. Dalam kehidupan sehari-hari mesin listrik banyak dimanfaatkan pada peralatan rumah tangga listrik, kendaraan bermotor, peralatan kantor, peralatan kesehatan, dan sebagainya.

Ada tiga kategori utama untuk mesin putar (*rotating machines*) atau mesin dinamis yaitu mesin arus searah, mesin induksi, dan mesin sinkron. Dari kategori utama ini dikelompokkan lagi atas generator dan motor. Transformator termasuk kategori mesin statis, dan berdasarkan fasanya dibagi atas transformator satu fasa dan tiga fasa.

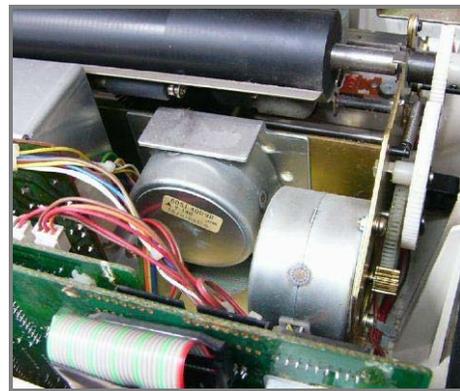
#### ➤ Penggunaan Transformator

Transformator merupakan salah satu alat listrik yang banyak digunakan pada bidang tenaga listrik dan bidang elektronika. Pada bidang tenaga listrik, transformator digunakan mulai dari pusat pembangkit tenaga listrik sampai ke rumah-rumah (Gambar 5.7).

Sebelum di transmisikan tegangan yang dihasilkan oleh pembangkit dinaikkan



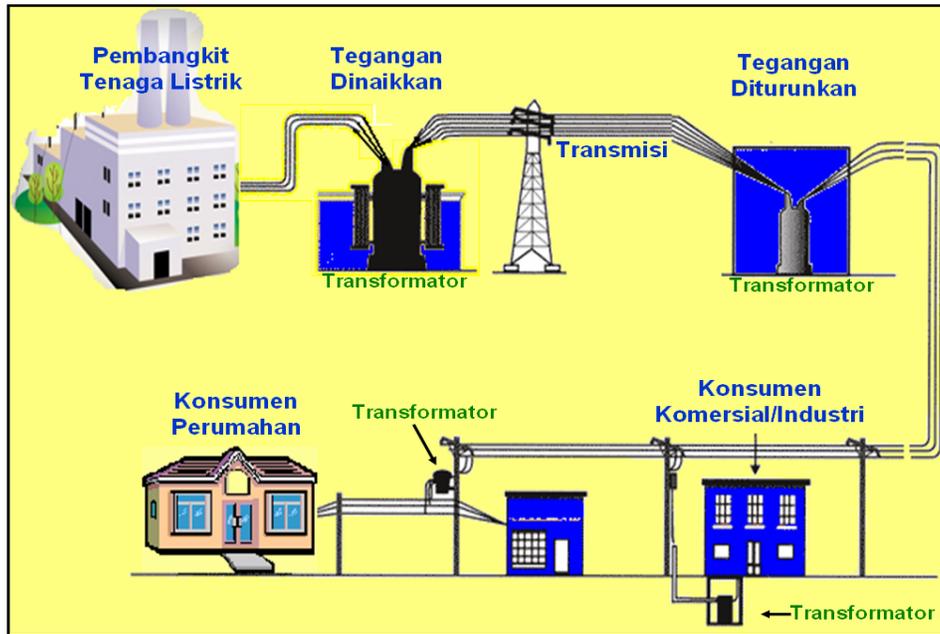
Gambar 5.4 Alternator Mobil



Gambar 5.5 Mesin Printer



Gambar 5.6 Mesin ATM



Gambar 5.7 Penggunaan Transformator pada Bidang Tenaga Listrik

terlebih dahulu dengan menggunakan sebuah **transformator daya** (Gambar 5.8) dengan tujuan untuk mengurangi kerugian energi yang terjadi saat listrik di transmisikan.

seperti kawasan industri, komersial, atau perumahan.



Gambar 5.8 Transformator Daya



Gambar 5.9 Transformator Distribusi Tipe Tiang

Kemudian sebelum digunakan oleh konsumen tegangan akan diturunkan lagi secara bertahap dengan menggunakan **transformator distribusi** (Gambar 5.9), sesuai dengan peruntukannya

Transformator yang dimanfaatkan di rumah tangga pada umumnya mempunyai ukuran yang lebih kecil, seperti yang digunakan untuk menyesuaikan

tegangan dari peralatan rumah tangga listrik dengan suplai daya yang tersedia.

Transformator dengan ukuran yang lebih kecil lagi biasanya digunakan pada perangkat elektronik seperti radio, televisi, dan sebagainya (Gambar 5.10).



Gambar 5.10 Transformator pada Peralatan Elektronik

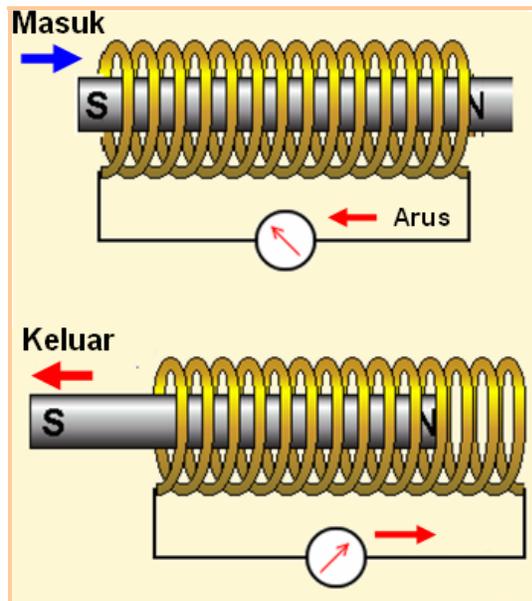
## 5.1 Transformator Satu

### 5.1.1 Konstruksi dan Prinsip Kerja

Dalam suatu eksperimennya **Michael Faraday** dengan menggunakan bahan-bahan berupa sebuah coil, magnet batang dan galvanometer (Gambar 5.11) dapat membuktikan bahwa bila kita mendorong medan magnet batang ke dalam coil tersebut, dengan kutub utaranya menghadap coil tersebut, ketika batang magnet sedang bergerak, jarum galvanometer memperlihatkan penyimpangan yang menunjukkan bahwa sebuah arus telah dihasilkan di dalam coil tersebut.

Bila batang magnet tersebut digerakkan dengan arah sebaliknya maka arah penunjukkan pada galvanometer arahnya pun berlawanan yang menunjukkan bahwa arah arus yang terjadi berlawanan juga.

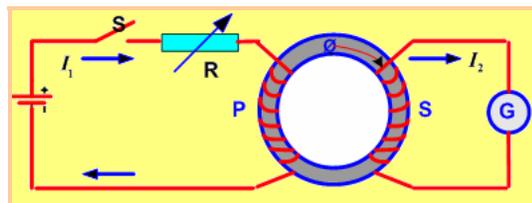
**Jadi yang terjadi dalam percobaan itu adalah apa yang disebut arus imbas yang dihasilkan oleh tegangan gerak listrik imbas.**



Gambar 5.11 Percobaan Arus Induksi

Dalam percobaan lainnya Michael Faraday mencobakan sebuah cincin yang terbuat dari besi lunak, kemudian cincin besi lunak tersebut dililit dengan kawat tembaga berisolasi (Gambar 5.12).

Bila saklar (S) ditutup, maka akan terjadi rangkaian tertutup pada sisi primer, demikian arus  $I_1$  akan mengalir



Gambar 5.12 Percobaan Induksi

pada rangkaian sisi primer tersebut, sedangkan pada lilitan sekunder tidak ada arus yang mengalir. Tetapi bila saklar (S) ditutup dan dibuka secara

bergantian maka jarum galvanometer akan memperlihatkan adanya penyimpangan yang arahnya berubah-ubah ke kiri dan ke kanan. Perubahan arah penunjukkan jarum galvanometer ini disebabkan adanya tegangan induksi pada lilitan sekunder, sehingga  $I_2$  mengalir melalui galvanometer.

Dari percobaan seperti telah dijelaskan diatas Michael Faraday dapat menyimpulkan bahwa **tegangan gerak listrik imbas  $e$  didalam sebuah rangkaian listrik adalah sama dengan perubahan fluks yang melalui rangkaian-rangkaian tersebut.**

Jika kecepatan perubahan fluks dinyatakan didalam weber/detik, maka tegangan gerak listrik  $e$  dinyatakan dalam Volt, yang dalam bentuk persamaannya adalah :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(5.1-1)$$

pers (5.1 - 1) ini dikenal dengan hukum **Induksi Faraday, tanda negatif** menunjukkan bahwa **arus induksi akan selalu mengadakan perlawanan terhadap yang menghasilkan arus induksi tersebut.** Bila coil terdiri dari  **$N$  Lilitan**, maka tegangan gerak listrik imbas yang dihasilkan merupakan jumlah dari tiap lilitan, dalam bentuk persamaan :

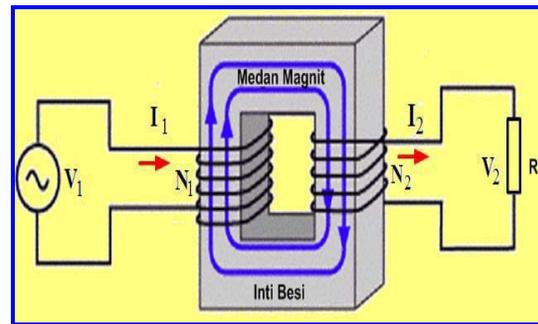
$$e = -N\frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(5.1-2)$$

dan  $Nd\phi$  dinamakan **tautan fluksi** (Flux Linkages) didalam alat tersebut.

### Definisi Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi Listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain dengan frekuensi yang sama, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet.

Secara konstruksinya transformator terdiri atas dua kumparan yaitu primer dan sekunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka fluks bolak-balik akan terjadi pada kumparan sisi primer, kemudian fluks tersebut akan mengalir pada inti transformator, dan selanjutnya fluks ini akan mengimbas pada kumparan yang ada pada sisi sekunder yang mengakibatkan timbulnya fluks magnet di sisi sekunder, sehingga pada sisi sekunder akan timbul tegangan (Gambar 5.13).



Gambar 5.13 Fluks Magnet Transformator

Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, dikenal dua jenis transformator, yaitu tipe inti (**core type**) dan tipe cangkang (**shell type**).

Pada **transformator tipe inti** (Gambar 5.14), kumparan mengelilingi inti, dan pada umumnya inti transformator  $L$  atau  $U$ . Peletakkan kumparan pada inti diatur secara berhimpitan antara kumparan primer dengan sekunder. Dengan pertimbangan kompleksitas cara isolasi tegangan pada kumparan, biasanya sisi kumparan tinggi diletakkan di sebelah luar.

Sedangkan pada **transformator tipe cangkang** (Gambar 5.15) kumparan dikelilingi oleh inti, dan pada umumnya intinya berbentuk huruf E dan huruf I, atau huruf F.

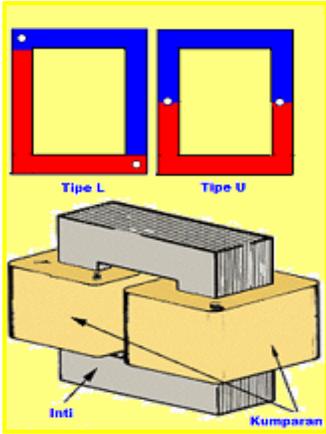
Untuk membentuk sebuah transformator tipe Inti maupun Cangkang, inti dari transformator yang berbentuk huruf tersebut disusun secara berlapis-lapis (laminasi), jadi bukan berupa besi pejal..

Tujuan utama penyusunan inti secara berlapis (Gambar 5.16) ini adalah untuk mengurangi kerugian energi akibat "Eddy Current" (arus pusar), dengan cara laminasi seperti ini maka ukuran jerat induksi yang berakibat terjadinya rugi energi di dalam inti bisa dikurangi. Proses penyusunan inti Transformator biasanya dilakukan setelah proses pembuatan lilitan kumparan transformator pada rangka (koker) selesai dilakukan.

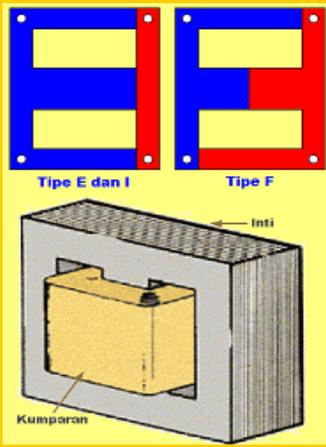
### 5.1.2 Transformator Ideal

Sebuah transformator dikatakan ideal, apabila dalam perhitungan dianggap tidak ada kerugian-kerugian yang terjadi pada transformator tersebut, seperti rugi akibat resistansi, induktansi, arus magnetisasi, maupun akibat fluks bocor. Jika sebuah transformator **tanpa beban** (Gambar 5.17), kumparan primernya dihubungkan dengan dengan sumber tegangan arus bolak-balik (abb) sinusoid  $V_1$ , maka akan mengalir arus primer  $I_0$  yang juga mempunyai bentuk gelombang sinusoidal, bila diasumsikan kumparan  $N_1$  merupakan reaktif murni, maka  $I_0$  akan tertinggal  $90^\circ$  dari  $V_1$ . Arus primer ini akan menimbulkan fluks sinusoidal yang sefasa,

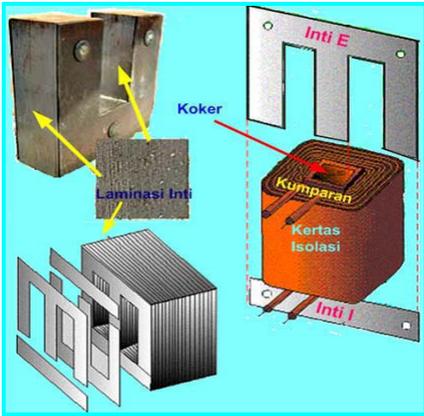
$$\phi = \phi_{maks} \sin \omega t \dots\dots\dots(5.1- 3)$$



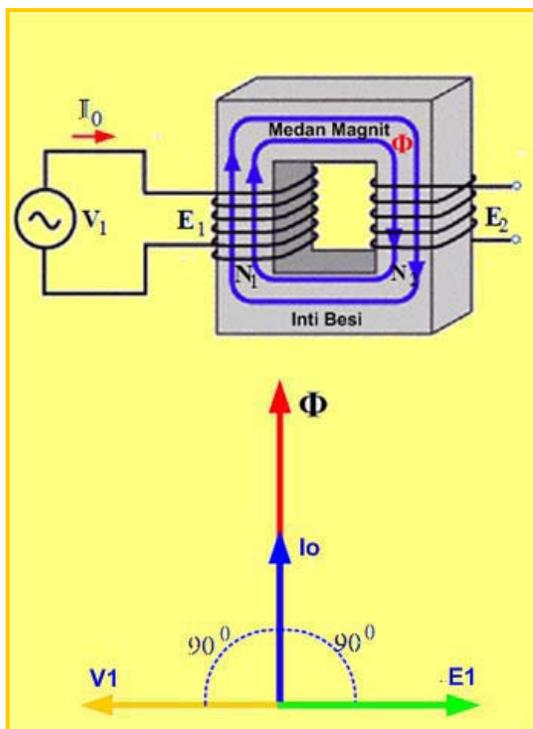
Gambar 5.14 Transformator Tipe Inti



Gambar 5.15 Tranformator Tipe Cangkang

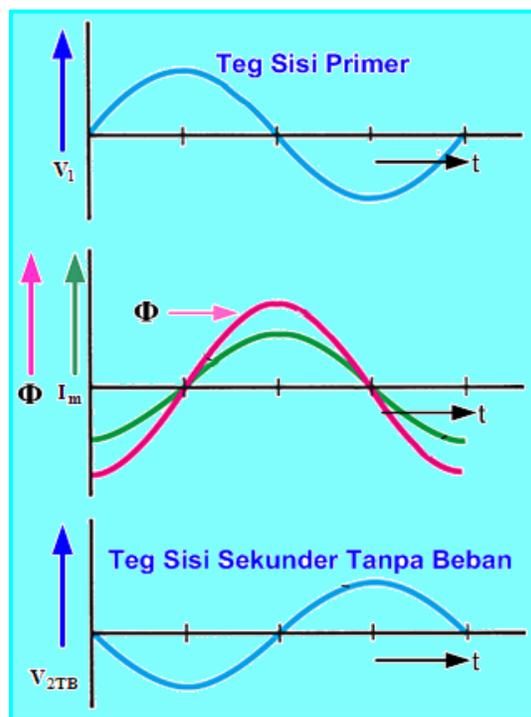


Gambar 5.16 Laminasi Inti Transformator



Gambar 5.17 Transformator Tanpa Beban

**ruji tembaga** ( $I_C$ ). Arus magnetisasi ini menghasilkan fluks ( $\Phi$ ).



Gambar 5.18 Arus Tanpa Beban

Fluks yang sinusoidal akan mengakibatkan terbangkitnya tegangan induksi  $E_1$

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \text{ Volt}$$

$$e_1 = -N_1 \frac{d(\phi_{\text{maks}} \sin \omega t)}{dt} = -N_1 \omega \phi_{\text{maks}} \cos \omega t$$

$$E_1 = \frac{N_1 2\pi f \phi_{\text{maks}}}{\sqrt{2}} = 4,44 N_1 f \phi_{\text{maks}} \quad (5.1-4)$$

maka pada sisi sekunder, fluks tersebut akan mengakibatkan timbulnya tegangan  $E_2$ .

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \text{ Volt}$$

$$e_2 = -N_2 \omega \phi_{\text{maks}} \cos \omega t \text{ Volt}$$

$$E_2 = 4,44 N_2 f \phi_{\text{maks}} \text{ Volt} \dots \dots \dots (5.1 - 5)$$

Arus primer yang mengalir pada transformator saat sekunder tanpa beban, bukan merupakan arus induktif murni, tetapi terdiri dari dua komponen arus yaitu **arus magnetisasi** ( $I_m$ ) dan **arus**

Bentuk gelombang arus magnetisasi (Gambar 5.18) yang berbentuk sinusoidal akan berubah bentuk akibat pengaruh sifat besi (inti) yang tidak linear, sehingga bentuk gelombang berubah seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5.19.

Sebuah Transformator Ideal dalam keadaan berbeban, seperti dieperlihatkan pada gambar 5.20.

Bila  $v_2 = \sqrt{2} \cdot V_2 \cdot \sin \omega t$ , dimana  $V_2$  nilai tegangan efektif dari terminal sekunder

kemudian  $i_2 = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{V_2}{Z}\right) \sin(\omega t - \phi)$ ,  $\phi$

adalah sudut impedansi dari beban.

Dalam bentuk phasor :

$$I_2 = \frac{V_2}{Z} = |I_2| \angle -\phi$$

dimana  $|I_2| = \left| \frac{V_2}{Z_2} \right|$  dan  $Z = |Z| \angle \varphi$

$$v_1 = \sqrt{2} \cdot \frac{V_2}{K} \sin \omega t, \text{ efektifnya } V_1 = \frac{V_2}{K}$$

sedangkan untuk arus :

$$i_1 = \sqrt{2} \cdot I_2 \cdot K \sin(\omega t - \varphi)$$

$$= \sqrt{2} I_1 \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

dalam bentuk phasor :  $I_1 = I_2 \cdot K$

Impedansi dilihat dari sisi sekunder :

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{V_2 / K}{I_2 K} = \frac{V_2}{I_2 K^2}$$

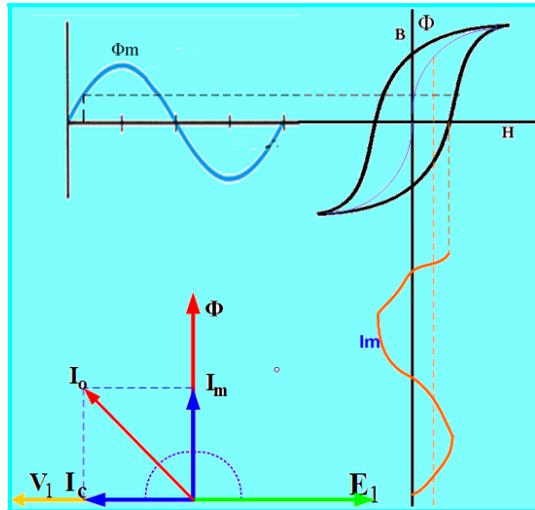
$$Z_{in} = \frac{Z}{K^2} \dots \dots \dots (5.1 - 6)$$

### 5.1.3 Transformator Berbeban

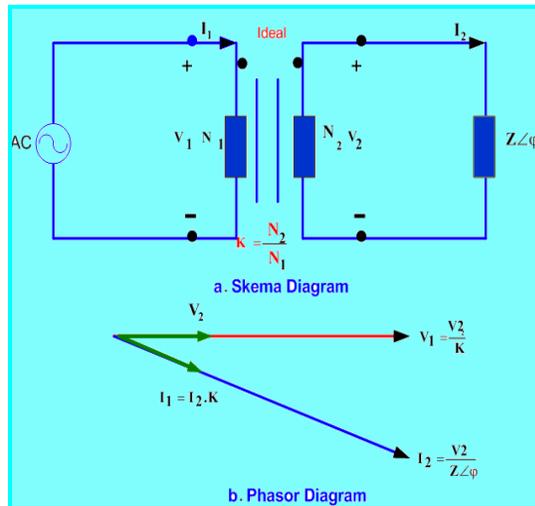
Pada sub bab terdahulu telah dijelaskan bagaimana keadaan transformator secara ideal baik saat tanpa beban maupun berbeban.

Dalam prakteknya apabila sisi kumparan sekunder transformator diberi beban (Gambar 5.21) maka besar tegangan yang di induksikan ( $E_2$ ) tidak akan sama dengan tegangan pada terminal ( $V_2$ ), hal ini terjadi karena adanya kerugian pada kumparan transformator.

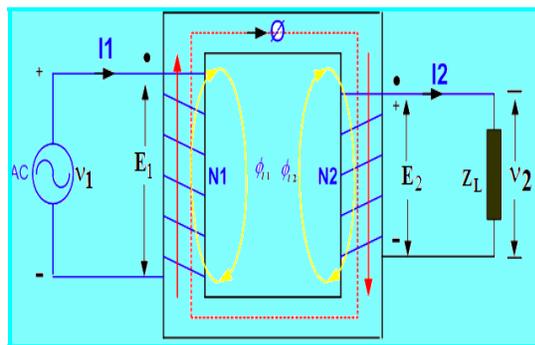
Apabila transformator diberi beban  $Z_L$  maka arus  $I_2$  akan mengalir pada beban tersebut, arus yang mengalir ini akan mengakibatkan timbulnya gaya gerak magnet ( $ggm$ )  $N_2 I_2$  yang mana arahnya cenderung melawan arah fluks bersama yang telah ada disebabkan arus magnetisasi  $I_m$ .



Gambar 5.19 Kurva B – H



Gambar 5.20 Transformator Ideal



Gambar 5.21 Transformator Berbeban

Untuk menjaga agar fluks bersama yang telah ada bisa dijaga dipertahankan nilainya, maka pada sisi kumparan primer arus mengalir arus  $I_2'$  yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban  $I_2'$ , sehingga arus yang mengalir pada sisi kumparan primer menjadi :

$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_2'$  dimana  $\bar{I}_0 = \bar{I}_C + \bar{I}_m$ , apabila  $I_C$  (rugi besi) diabaikan, maka nilai  $I_0 = I_m$ , sehingga  $\bar{I}_1 = \bar{I}_m + \bar{I}_2'$ . Untuk menjaga agar fluks bersama yang ada pada inti transformator tetap nilainya, maka :

$$N_1 I_m = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

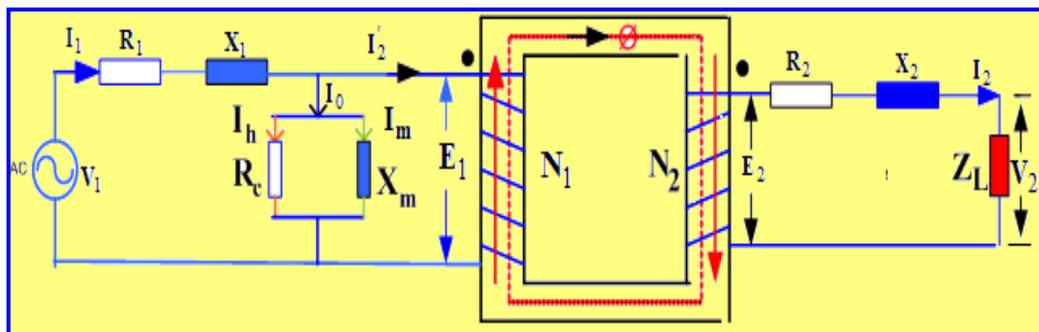
$$N_1 I_m = N_1 (I_m + I_2') - N_2 I_2$$

$$N_1 I_m = N_1 I_m + N_1 I_2' - N_2 I_2, \text{ maka}$$

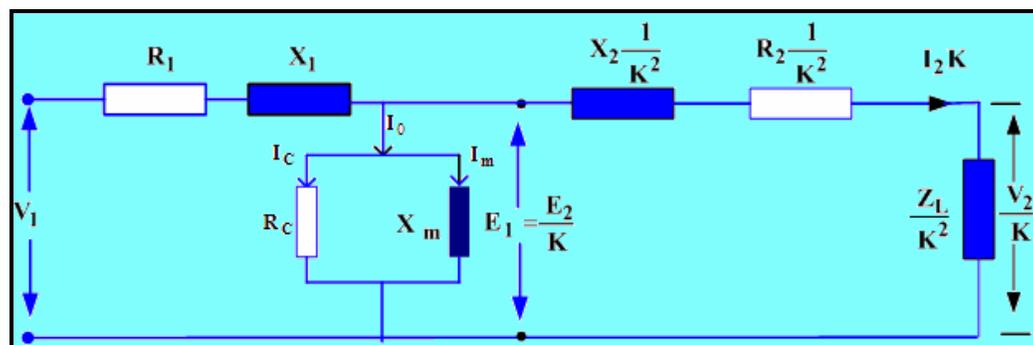
$$N_1 I_2' = N_2 I_2, \text{ nilai } I_2' = I_1 \text{ bila } I_m \text{ dianggap kecil, sehingga } \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots (5.1 - 7)$$

### 5.1.3.1 Rangkaian Ekuivalen

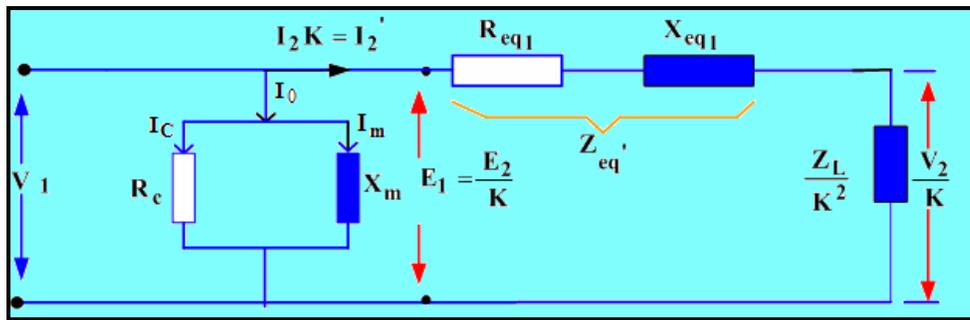
Untuk memudahkan menganalisis kerja transformator tersebut dapat dibuat rangkaian ekuivalen dan vektor diagramnya, rangkaian ekuivalen ini dapat dibuat dengan acuan sisi primer atau acuan sisi sekunder (Gambar 5.22).



Gambar 5.22 Rangkaian Ekuivalen Transformator



Gambar 5.23 Rangkaian Ekuivalen dengan Acuan Sisi Primer



Gambar 5.24 Rangkaian Ekuivalen dengan Acuan Sisi Primer disederhanakan

Yang dimaksud dengan acuan sisi primer adalah apabila parameter rangkaian sekunder dinyatakan dalam harga rangkaian primer dan harganya perlu dikalikan dengan faktor  $\frac{1}{K^2}$  (Gambar 5.23)

Untuk memudahkan dalam menganalisis, rangkaian ekuivalen pada gambar 5.23 dapat disederhanakan lagi, seperti diperlihatkan pada gambar 5.24.

Berdasarkan rangkaian diatas kita dapat menentukan nilai parameter yang ada pada transformator tersebut berdasarkan persamaan-persamaan berikut ini.

Impedansi ekuivalen transformator adalah :

$$Z_{eq1} = (R_1 + \frac{R_2}{K^2}) + j(X_1 + \frac{X_2}{K^2})$$

$$= R_{eq1} + jX_{eq1} \dots\dots\dots(5.1 - 8)$$

dimana

$$R_{eq1} = R_1 + \frac{R_2}{K^2} \dots\dots\dots(5.1 - 9)$$

$$X_{eq1} = X_1 + \frac{X_2}{K^2} \dots\dots\dots(5.1 - 10)$$

$$V_1 = E_1 + I_1 \cdot R_1 + I_1 \cdot X_1 \dots\dots\dots(5.1 - 11)$$

$$V_2 = E_2 + I_2 \cdot R_2 + I_2 \cdot X_2 \dots\dots\dots(5.1 - 12)$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} = K \text{ atau } E_1 = \frac{E_2}{K} \dots\dots\dots(5.1 - 13)$$

maka :

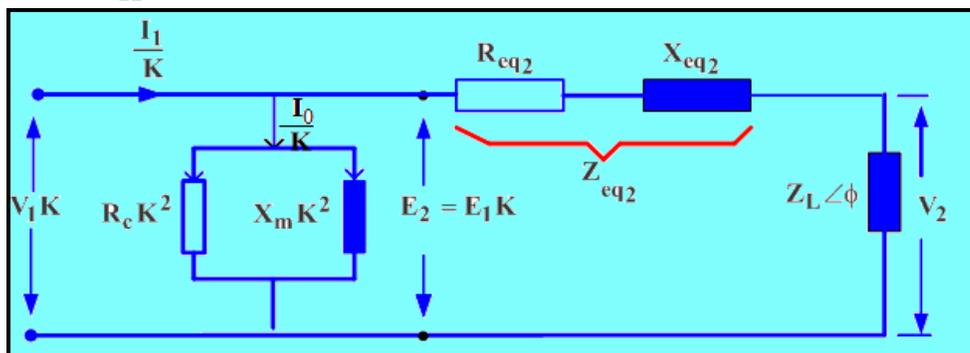
$$E_1 = \frac{1}{K} (I_2 \cdot Z_L + I_2 \cdot R_2 + I_2 \cdot X_2)$$

$$\text{sedangkan } \frac{I_2'}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = K \text{ atau } I_2 = \frac{I_2'}{K}$$

sehingga

$$E_1 = \frac{1}{K} (\frac{I_2'}{K} Z_L + \frac{I_2'}{K} R_2 + \frac{I_2'}{K} X_2) \dots\dots\dots(5.1-14)$$

$$\text{dan } V_1 = \frac{V_2}{K} + I_1 (R_{eq1} + jX_{eq1}) \dots\dots\dots(5.1 - 15)$$



Gambar 5.25 Rangkaian Ekuivalen dengan Acuan Sisi Sekunder

Rangkaian ekuivalen transformator bisa dibuat dengan acuan sisi sekunder (Gambar 5.25), untuk itu parameter rangkaian primer harus dinyatakan dalam harga rangkaian sekunder dan harganya perlu dikalikan dengan  $K^2$ .

$$\begin{aligned} Z_{eq2} &= (R_1 K^2 + R_2) + j(X_1 K^2 + X_2) \\ &= R_{eq2} + jX_{eq2} \dots\dots\dots(5.1-16) \end{aligned}$$

$$R_{eq2} = R_1 K^2 + R_2 \dots\dots\dots(5.1-17)$$

$$X_{eq2} = X_1 K^2 + X_2 \dots\dots\dots(5.1-18)$$

$$E_2 = K\{V_1 - (I_2 \cdot K \cdot R_1 + I_2 \cdot K \cdot X_1)\} \dots\dots\dots(5.1-19)$$

$$V_2 = K \cdot V_1 - I_2 (R_{eq2} + jX_{eq2}) \dots\dots\dots(5.1-20)$$

### 5.1.3.2 Perkiraan Tegangan Jatuh pada Transformator

Saat sebuah transformator dalam keadaan tanpa beban  $V_1$  kira-kira sama nilainya dengan  $E_1$ , sehingga  $E_2 = E_1 K$ . Juga  $E_2 = oV_2$ , dimana  $oV_2$  adalah terminal tegangan sekunder pada keadaan tanpa beban atau  $oV_2 = K \cdot V_1$ . Perbedaan keduanya adalah sebesar  $I_2 \cdot Z_{eq2}$ , sedangkan perkiraan tegangan jatuh pada sebuah transformator dengan acuan tegangan sekunder.

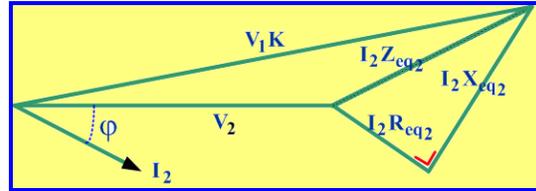
Tegangan jatuh pada sebuah transformator dipengaruhi oleh nilai beban dan faktor daya yang terhubung pada transformator tersebut.

- **Faktor Daya “Lagging”**

Tegangan jatuh total  $I_2 \cdot Z_{eq2} = AC = AF$  dan diasumsikan sama dengan AG. Perkiraan tegangan jatuh :

$$\begin{aligned} AG &= AD + DG \\ &= I_2 \cdot R_{eq2} \cdot \cos\phi + I_2 \cdot X_{eq2} \cdot \sin\phi \end{aligned}$$

dengan asumsi  $\phi_1 = \phi_2 = \phi$

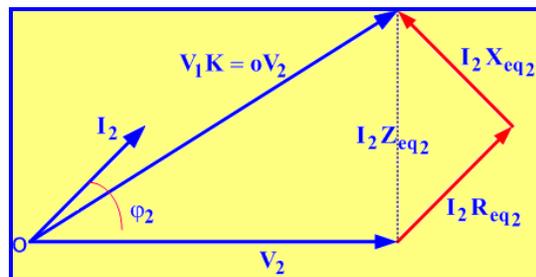


Gambar 5.26 Transformator Faktor Daya “Lagging”

- **Faktor Daya “Leading”**

Perkiraan tegangan jatuh untuk faktor daya *Leading*

$$= I_2 \cdot R_{eq2} \cos\phi - I_2 \cdot X_{eq2} \cdot \sin\phi \dots\dots\dots(5.1-21)$$



Gambar 2.27 Transformator Faktor Daya “Leading”

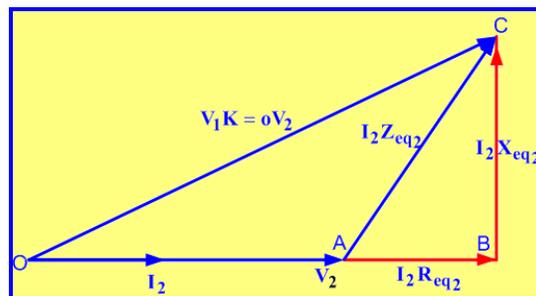
- **Faktor Daya “Unity”**

Secara umum, perkiraan tegangan jatuh pada transformator adalah :

$$I_2 \cdot R_{eq2} \cdot \cos\phi \pm I_2 \cdot X_{eq2} \cdot \sin\phi \dots\dots\dots(5.1 -22)$$

Perkiraan tegangan jatuh dilihat dari sisi primer adalah :

$$I_1 \cdot R_{eq1} \cdot \cos\phi \pm I_1 \cdot X_{eq1} \cdot \sin\phi \dots\dots\dots(5.1 -23)$$



Gambar 2.28 Transformator Faktor Daya “Unity”

Prosentase tegangan jatuh dilihat dari sisi sekunder :

$$= \frac{I_2 \cdot R_{eq2} \cdot \cos\phi \pm I_2 \cdot X_{eq2} \cdot \sin\phi}{oV_2} \times 100\%$$

$$= \frac{100\% \times I_2 \cdot R_{eq2} \cdot \cos\phi \pm 100\% \times I_2 \cdot X_{eq2} \cdot \sin\phi}{oV_2}$$

$$= V_r \cos\phi \pm V_x \sin\phi \dots\dots\dots(5.1 - 24)$$

### 5.1.3.3 Efisiensi Transformator

$$\text{Efisiensi} = \eta = \frac{\text{Daya Keluar}}{\text{Daya Masuk}}$$

$$= \frac{\text{Daya}_\text{Keluar}}{\text{Daya}_\text{Keluar} + \Sigma \text{Rugi}^2}$$

dimana  $\Sigma \text{Rugi} = P_{cu} + P_i$

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma \text{Rugi}}{\text{Daya}_\text{Masuk}} \quad (5.1 - 25)$$

### 5.1.3.4 Perubahan Efisiensi Terhadap Beban

Rugi Cu ( $P_{cu}$ ) =  $I_1^2 \cdot R_{eq1}$  atau  $I_2^2 \cdot R_{eq2} = W_c$

Rugi Inti ( $P_i$ ) = Rugi Histeris + Rugi Arus Pusar

$$= P_h + P_e$$

$$\frac{R_{eq1}}{V_1 \cdot \cos\phi_1} = \frac{P_i}{V_1 \cdot I_1^2 \cdot \cos\phi_1} \quad \text{atau}$$

$$P_i = I_1^2 \cdot R_{eq1} \quad (5.1 - 26)$$

dari persamaan diatas dapat ditarik kesimpulan, untuk beban tertentu, **efisiensi maksimum terjadi ketika rugi tembaga = rugi inti.**

### 5.1.3.5 Pengaturan Tegangan

Pengaturan Tegangan (*Regulation Voltage*) suatu transformator adalah perubahan tegangan sekunder antara beban nol dan beban penuh pada suatu faktor daya tertentu, dengan tegangan primer konstan.

Ada dua macam pengaturan tegangan yaitu, **Regulation Down (Reg Down)** dan **Regulation Up (Reg Up)** :

$$\% \text{Reg Down} = \frac{oV_2 - V_2}{oV_2} \times 100\% \quad (5.1-27)$$

$$\% \text{Reg Up} = \frac{oV_2 - V_2}{V_2} \times 100\% \quad (5.1-28)$$

Tegangan sisi sekunder tanpa beban sebagai referensi (acuan) adalah  $E_2' = \frac{E_2}{K} = E_1 = V_1$

dan jika tegangan terminal sekunder beban penuh sebagai referensi primer

$$V_2' = \frac{V_2}{K}$$

% Pengaturan (*Regulation*)

$$= \frac{V_1 - V_2'}{V_1} \times 100\%$$

$$= \frac{I_1 \cdot R_{eq1} \cdot \cos\phi + I_1 \cdot X_{eq1} \cdot \sin\phi}{V_1} \times 100\%$$

$$= V_r \cos\phi + V_x \cdot \sin\phi \dots\dots\dots(5.1 - 29)$$

### 5.1.4 Pengujian Transformator

Untuk menganalisis transformator berdasarkan rangkaian ekuivalen, maka perlu diketahui parameter-parameter yang ada pada transformator tersebut.

Parameter transformator bisa diketahui dari datasheet yang diberikan oleh

pabrik pembuat atau bila tidak ada bisa diketahui berdasarkan hasil percobaan.

Dua macam percobaan yang terpenting adalah percobaan beban nol (tanpa beban) dan percobaan hubung singkat. Percobaan beban dilakukan untuk mengetahui rugi inti dari transformator, sedangkan percobaan hubung singkat dilakukan untuk mengetahui rugi tembaga.

#### 5.1.4.1 Percobaan Beban Nol

Pada saat sisi sekunder dari transformator tidak diberi beban (Gambar 5.29), tegangan sisi primer hanya akan mengalirkan arus pada rangkaian primer yang terdiri dari impedansi bocor primer  $Z_1 = R_1 + jX_1$  dan impedansi penguatan :  $Z_m = R_c + jX_m$ .

Karena umumnya  $Z_1$  jauh lebih kecil dari  $Z_m$ , maka  $Z_1$  biasa diabaikan tanpa menimbulkan suatu kesalahan yang berarti, rangkaian ekuivalennya (Gambar 5.30).

Pada umumnya percobaan beban nol dilakukan dengan alat ukur diletakkan di sisi tegangan rendah dengan besarnya tegangan yang diberikan sama dengan tegangan nominalnya.

Hal ini dilakukan dengan pertimbangan sebagai berikut :

- Bekerja pada sisi tegangan tinggi lebih berbahaya ;
- Alat-lat ukur tegangan rendah lebih mudah didapat.

Dari hasil penunjukkan alat –alat ukur didapat nilai sebagai berikut :

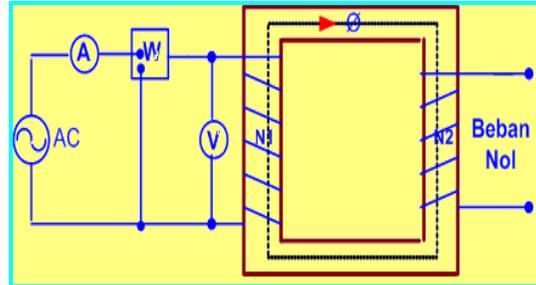
$$I_0 = \sqrt{I_c^2 + I_m^2} \dots\dots\dots(5.1 - 31)$$

$$P_0 = V_1 \cdot I_0 \cdot \cos\phi_0 \dots\dots\dots(5.1 - 32)$$

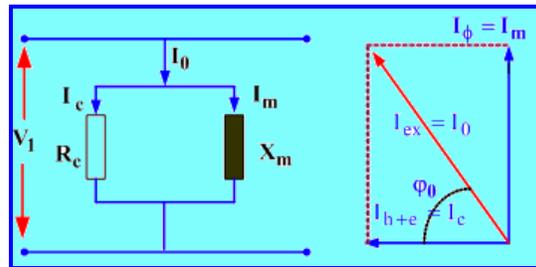
$$I_c = I_0 \cdot \cos\phi_0 \quad \text{dan} \quad I_m = I_0 \cdot \sin\phi_0$$

$$R_c = \frac{V_0}{I_c} = \frac{V_0^2}{P_0} \dots\dots\dots(5.1 - 34)$$

$$X_m = \frac{V_0}{I_m} \dots\dots\dots(5.1 - 35)$$



Gambar 5.29 Rangkaian Percobaan Beban Nol



Gambar 5.30 Rangkaian Ekuivalen Hasil Percobaan Beban Nol

#### 5.1.4.2 Percobaan Hubung Singkat

Pada saat melakukan percobaan hubung singkat, sisi tegangan rendah transformator di hubung singkat (Gambar 5.31), alat ukur diletakkan di sisi tegangan tinggi dengan nilai arus dan tegangan yang telah direduksi (dikurangi), tegangan yang diberikan ± 5%- 10% dari harga nominalnya.

Nilai arus yang melalui kumparan yang dihubungkan singkat sama dengan arus nominalnya, oleh karena besarnya  $V_2$  sama dengan nol, maka besarnya  $E_2$  adalah sama dengan rugi tegangan pada belitan sekundernya.

$E_{2HS} = I_2 \cdot Z_2$   
 sedangkan dalam keadaan normal  $E_2 = V_2 + I_2 \cdot Z_2$ , karena itu didalam percobaan hubung singkat ini  $E_{2HS}$  hanya 5% - 10% dari  $E_2$ .

Daya yang diserap pada saat percobaan hubung singkat ini dapat dianggap sama dengan besarnya kerugian tembaga pada kedua sisi kumparan tersebut.

$$\begin{aligned}
 P_{HS} &= I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 \\
 &= I_1^2 \cdot R_1 + (I_1')^2 \cdot R_2' \\
 &= I_1^2 \cdot (R_1 + R_2') = I_1^2 \cdot R_{eq1} \\
 \therefore R_{eq1} &= \frac{P_{HS}}{I_1^2} \dots\dots(5.1 - 36)
 \end{aligned}$$

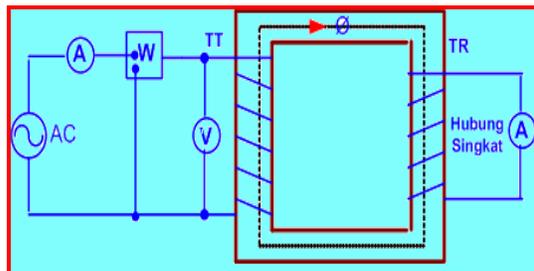
jika resistansi ekuivalen diperoleh dari percobaan hubung singkat tersebut akan digunakan untuk memperhitungkan efisiensi, maka resistansi ini harus dikoreksi pada temperatur kerja yaitu 75°C, sehingga :

$$R_{75} = R \cdot \frac{234,5 + 75}{234,5 + t}$$

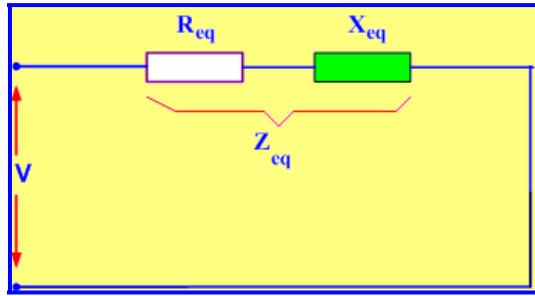
$$Z_{eq1} = \frac{V_{HS}}{I_1} \dots\dots\dots(5.1 - 37)$$

$$X_{eq1} = \sqrt{(Z_{eq1})^2 - (R_{eq1})^2} \dots\dots(5.1 - 38)$$

$$\text{Cos}\phi_{HS} = \frac{P_{HS}}{V_{HS} \cdot I_1} \dots\dots\dots(5.1 - 39)$$



Gambar 5.31 Rangkaian Percobaan Hubung Singkat

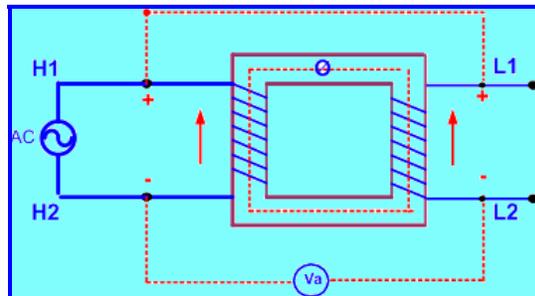


Gambar 5.32 Rangkaian Ekuivalen Hasil Percobaan Hubung Singkat

### 5.1.4.3 Penentuan Polaritas Transformator Satu Fasa

Cara melilit kumparan transformator sangat menentukan tegangan induksi yang dibangkitkan dan polaritas dari transformator tersebut (Gambar 5.32).

Bila sisi primer diberi tegangan, akan menghasilkan arah tegangan induksi seperti ditunjukkan arah panah. Terminal H1 mempunyai polaritas yang sama dengan L1 yaitu positif (+), sedangkan H2 polaritasnya sama dengan L2 (-).



Gambar 5.32 Penentuan Polaritas Transformator

Posisi polaritas seperti tersebut diatas disebut dengan *polaritas pengurangan*, sebaliknya jika polaritas H1 (+) = L2 (+) dan H2 (-) = L1 (-), akibat cara melilit kumparan sekunder sebaliknya dari kondisi pertama, maka disebut *polaritas penjumlahan*.

Penentuan polaritas seperti tersebut dijelaskan diatas bisa diketahui dengan cara melakukan pengukuran tegangan sebagai berikut, bila :

- $V_a < V_H$  disebut polaritas pengurangan.
- $V_a > V_H$  disebut polaritas penjumlahan.

### 5.1.5 Paralel Transformator

Penambahan beban pada suatu saat menghendaki adanya kerja paralel diantara transformator. Tujuan utama kerja paralel ialah supaya beban yang dipikul sebanding dengan kemampuan KVA masing-masing transformator, sehingga tidak terjadi pembebanan yang berlebihan.

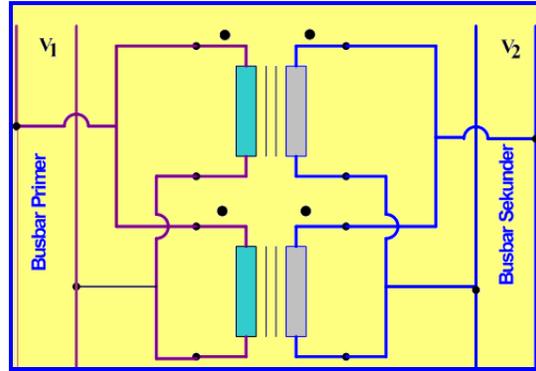
Untuk kerja paralel transformator ini diperlukan beberapa syarat :

1. Kumparan primer dari transformator harus sesuai dengan tegangan dan frekuensi sitem suplai (jala – jala) ;
2. Polaritas transformator harus sama ;
3. Perbandingan tegangan harus sama ;
4. Tegangan impedansi pada keadaan beban penuh harus sama ;
5. Perbandingan reaktansi terhadap resistansi sebaiknya sama.

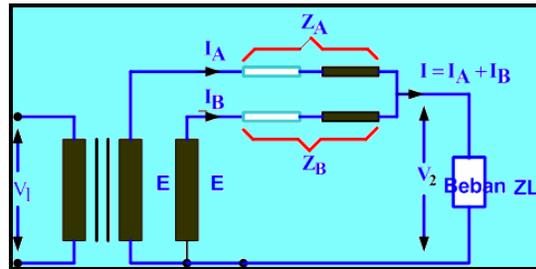
#### 5.1.5.1 Paralel Dua Transformator dalam Keadaan Ideal

Keadaan ideal dari dua transformator mempunyai perbandingan tegangan sama dan mempunyai segitiga tegangan impedansi yang sama dalam ukuran dan bentuk.

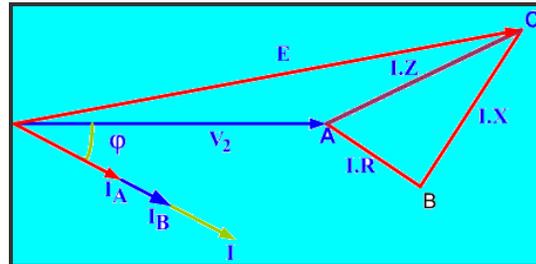
Segitiga ABC menunjukkan segitiga tegangan impedansi yang sama dari kedua transformator. Arus  $I_A$  dan  $I_B$  dari masing-masing transformator sefasa dengan arus beban  $I$  dan berbanding



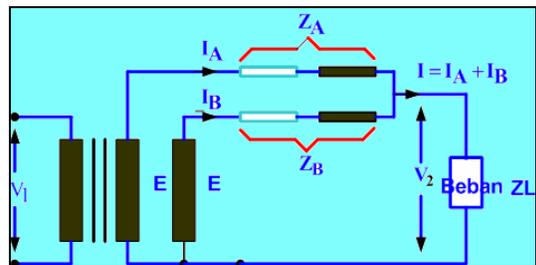
Gambar 5.33 Rangkaian Paralel Transformator Satu Fasa



Gambar 5.34 Rangkaian Ekuivalen Paralel Transformator Satu Fasa



Gambar 5.35 Diagram Vektor Paralel Transformator Satu Fasa



Gambar 5.36 Rangkaian Paralel Transformator Satu Fasa Teg Sama

terbalik terhadap masing-masing impedansinya,

$$I = I_A + I_B$$

$$V_2 = E - I_A \cdot Z_A = E - I_B \cdot Z_B = E - I \cdot Z_{AB}$$

$$I_A \cdot Z_A = I_B \cdot Z_B \quad \text{atau} \quad \frac{I_A}{Z_B} = \frac{I_B}{Z_A}$$

$$I_A = \frac{I \cdot Z_B}{(Z_A + Z_B)} \dots\dots\dots (5.1 - 40)$$

dan  $I_B = \frac{I \cdot Z_A}{(Z_A + Z_B)} \dots\dots\dots (5.1 - 41)$

$Z_A, Z_B$  = Impedansi dari masing-masing transformator

$I_A, I_B$  = Arus masing-masing transformator

### 5.1.5.2 Paralel Transformator Perbandingan Tegangan Sama

Diasumsikan tegangan tanpa beban dari kedua transformator dari kedua sekunder sama  $E_A = E_B = E$ , tidak ada perbedaan fasa antara  $E_A$  dan  $E_B$ , hal ini dapat dilakukan jika arus magnetisasi dari kedua transformator tidak terlampau jauh berbeda antara yang satu dengan yang lainnya. Di bawah kondisi ini, kedua sisi primer dan sekunder dari kedua transformator dapat dihubungkan secara paralel dan tidak ada arus sirkulasi antara keduanya saat tanpa beban.

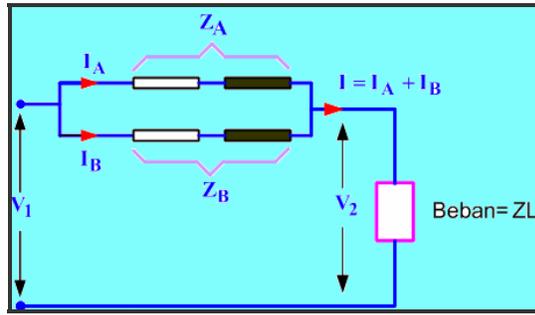
Bila admitansi magnetisasi diabaikan, kedua transformator dapat dihubungkan dengan rangkaian ekuivalen seperti diperlihatkan pada Gambar 5.37, dan vektor diagramnya seperti diperlihatkan pada Gambar 5.38

$Z_A, Z_B$  = Impedansi dari masing-masing transformator.

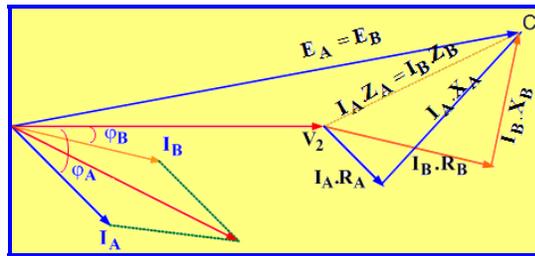
$I_A, I_B$  = Arus masing-masing transformator

$V_2$  = Tegangan terminal

$I$  = Arus total



Gambar 5.37 Rangkaian Ekuivalen Paralel Transformator Tegangan Sama



Gambar 5.38 Diagram Vektor Paralel Transformator Tegangan Sama

$$I_A \cdot Z_A = I_B \cdot Z_B = I \cdot Z_{AB}$$

$$V_2 \cdot I_A = V_2 \cdot I \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \quad \text{dan}$$

$$V_2 \cdot I_B = V_2 \cdot I \frac{Z_A}{Z_A + Z_B}$$

sedangkan  $V_2 \cdot I \cdot 10^{-3} = S$  kombinasi daya beban dalam KVA dan daya dalam KVA untuk masing-masing transformator adalah :

$$S_A = S \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \dots\dots\dots (5.1 - 42)$$

dan  $S_B = S \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} \dots\dots\dots (5.1 - 43)$

## 5.2 Transformator Tiga

Sebuah transformator tiga fasa secara prinsip sama dengan sebuah transformator satu fasa, perbedaan yang paling mendasar adalah pada sistem kelistrikannya yaitu sistem satu fasa dan tiga fasa. Sehingga sebuah transformator tiga fasa bisa dihubung bintang, segi-tiga, atau zig-zag.

Transformator tiga fasa banyak digunakan pada sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik karena pertimbangan ekonomis. Transformator tiga fasa banyak sekali mengurangi berat dan lebar kerangka, sehingga harganya dapat dikurangi bila dibandingkan dengan penggabungan tiga buah transformator satu fasa dengan “rating” daya yang sama.

Tetapi transformator tiga fasa juga mempunyai kekurangan, diantaranya bila salah satu fasa mengalami kerusakan, maka seluruh transformator harus dipindahkan (diganti), tetapi bila transformator terdiri dari tiga buah transformator satu fasa, bila salah satu fasa transformator mengalami kerusakan. Sistem masih bisa dioperasikan dengan sistem “ open delta “.

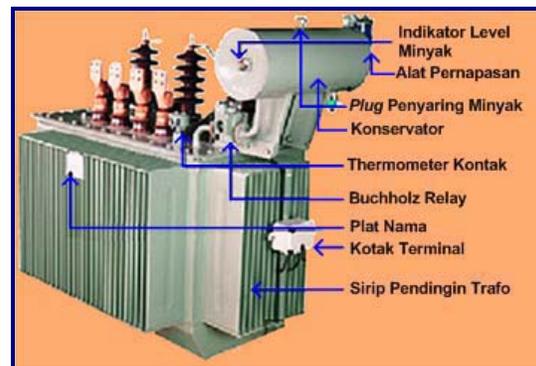
### 5.2.1 Konstruksi Transformator

Secara umum sebuah transformator tiga fasa mempunyai konstruksi hampir sama, yang membedakannya adalah alat bantu dan sistem pengamanannya, tergantung pada letak pemasangan, sistem pendinginan, pengoperasian, fungsi dan pemakaiannya.

Bagian utama, alat bantu, dan sistem pengaman yang ada pada sebuah transformator daya (Gambar 5.39), adalah :

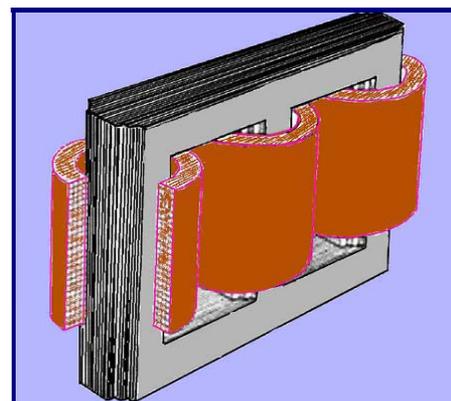


a. Bagian dalam Transformator



b. Bagian luar Transformator

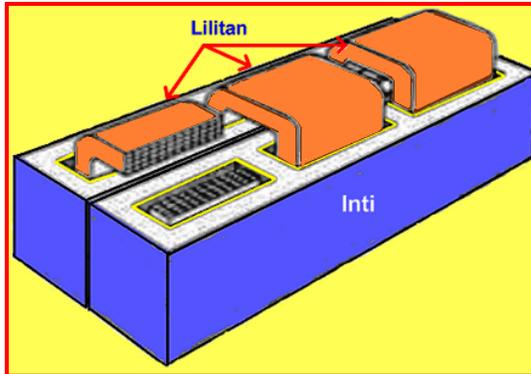
Gambar 5.39 Konstruksi Transformator Tiga Fasa



Gambar 5.40 Transformator Tipe Inti

#### ◆ Inti Besi Transformator

Seperti telah dijelaskan pada pembahasan transformator satu fasa inti besi berfungsi sebagai tempat mengalirnya fluks dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Sama seperti transformator satu fasa, berdasarkan cara melilit kumparanya ada dua jenis, yaitu tipe inti (Gambar 5.40) dan tipe cangkang (Gambar 5.41).



Gambar 5.41 Transformator Tipe Cangkang

#### ◆ Kumparan Transformator

Kumparan transformator terdiri dari lilitan kawat berisolasi dan membentuk kumparan. Kawat yang dipakai adalah kawat tembaga berisolasi yang berbentuk bulat atau plat.

Kumparan-kumparan transformator diberi isolasi baik terhadap kumparan lain maupun inti besinya. Bahan isolasi berbentuk padat seperti kertas prespan, pertinak, dan lain-nya.

#### ◆ Minyak Transformator

Untuk mendinginkan transformator saat beroperasi maka kumparan dan inti transformator direndam di dalam minyak transformator, minyak juga berfungsi sebagai isolasi.

Oleh karena itu minyak transformator harus memenuhi persyaratan, sebagai berikut :

- Mempunyai kekuatan isolasi (*Dielectric Strength*);
- Penyalur panas yang baik dengan berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel kecil dapat mengendap dengan cepat;
- Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersikulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik;
- Tidak nyala yang tinggi, tidak mudah menguap;
- Sifat kimia yang stabil.

#### ◆ Tangki Transformator

Tangki transformator berfungsi untuk menyimpan minyak transformator dan sebagai pelindung bagian-bagian transformator yang direndam dalam minyak. Ukuran tangki disesuaikan dengan ukuran inti dan kumparan.

#### ◆ Konservator Transformator

Konservator merupakan tabung berisi minyak transformator yang diletakan pada bagian atas tangki. Fungsinya adalah :

- Untuk menjaga ekspansi atau meluapnya minyak akibat pemanasan;
- Sebagai saluran pengisian minyak.

#### ◆ Sistem Pendinginan Transformator

Sistem pendinginan pada transformator dibutuhkan supaya panas yang timbul pada inti besi dan kumparan dapat disalurkan keluar sehingga tidak merusak isolasi didalam transformator. Media yang digunakan pada sistem pendinginan dapat berupa : udara / gas, minyak dan air. Sirkulasinya dilakukan secara : alamiah (*natural*) dan atau paksaan (*forced*).

#### ◆ Bushing Transformator

*Bushing* transformator adalah sebuah konduktor yang berfungsi untuk menghubungkan kumparan transformator dengan rangkaian luar yang diberi selubung isolator. Isolator juga berfungsi sebagai penyekat antara konduktor dengan tangki transformator. Bahan *bushing* adalah terbuat dari porselin yang tengahnya berlubang (Gambar 5.42).



Gambar 5.42 Bushing Transformator

#### ◆ Alat Pernapasan

Naik turunnya beban transformator dan suhu udara sekeliling transformator, mengakibatkan suhu minyak berubah-ubah mengikuti perubahan tersebut. Bila suhu minyak naik, minyak memuai dan mendesak udara diatas permukaan minyak keluar dari tangki dan bila suhu turun sebaliknya udara akan masuk. Keadaan ini merupakan proses pernapasan transformator. Tetapi udara luar yang lembab akan menurunkan nilai tegangan tembus minyak. Untuk mencegah hal itu transformator dilengkapi dengan alat pernafasan (Gambar 5.43) yang berupa tabung berisi zat higroskopis, seperti kristal silikagel.



Gambar 5.43 Alat Pernafasan

#### ◆ Tap Changer

*Tap changer* (Gambar 5.44) adalah alat yang berfungsi untuk mengubah perbandingan lilitan transformator untuk mendapatkan tegangan operasi pada sisi sekunder sesuai yang dibutuhkan oleh tegangan jaringan (beban) atau karena tegangan sisi primer yang berubah-ubah. Tap changer (perubahan tap) dapat dilakukan dalam keadaan berbeban (*on load*) atau keadaan tidak ber-beban (*off load*). Untuk tranformator distribusi perubahan tap changer dilakukan dalam keadaan tanpa beban.



Gambar 5.44 Tap Changer

◆ **Sirip-sirip Pendingin atau Radia-  
tor**

Berfungsi untuk memperluas daerah pendinginan, yaitu daerah yang berhubungan langsung dengan udara luar dan sebagai tempat terjadinya sirkulasi panas.

◆ **Alat Indikator**

Alat Indikator digunakan untuk memonitor kondisi komponen utama atau media bantu yang ada didalam transformator saat transformator beroperasi, seperti :

- suhu minyak ;
- permukaan minyak ;
- sistem pendinginan ;
- posisi tap.

◆ **Rele Buchholz (Buchholz Relay)**

Rele Buchholz biasa disebut juga rele gas, karena bekerjanya digerakan oleh pengembangan gas. Tekanan gas akan timbul bila minyak mengalami kenaikan temperatur yang diakibatkan oleh :

- Hubung singkat antar lilitan pada atau dalam fasa;
- Hubung singkat antar fasa;
- Hubung singkat antar fasa ke tanah;
- Busur api listrik antar laminasi;
- Busur api listrik karena kontak yang kurang baik.

Gas yang mengembang akan menggerakkan kontak-kontak rangkaian alarm atau rangkaian pemutus.

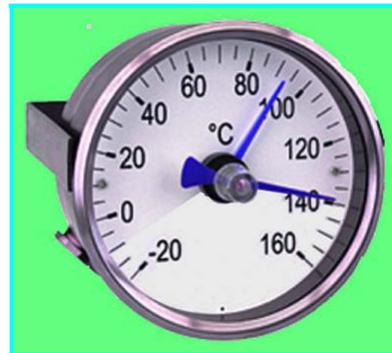
◆ **Plat Nama**

Plat nama yang terdapat pada bagian luar transformator sebagai pedoman saat pemasangan maupun perbaikan. Data-data yang dicantumkan seperti : Fasa dan frekuensi, daya nominal, tegangan primer/ sekunder, kelompok hubungan, arus nominal, % arus hubung

singkat, sistem pendinginan, volume minyak, dan lain-lain.



Gambar 5.45 Indikator Level Minyak



Gambar 5.46 Indikator Temperatur



Gambar 5.47 Rele Buchholz

## 5.2.2 Hubungan Transformator Tiga Fasa

Secara umum dikenal tiga cara untuk menyambung rangkaian listrik sebuah transformator tiga fasa, yaitu hubungan bintang, hubungan segitiga, dan hubungan Zig-zag.

### ◆ Hubungan Bintang - bintang

Hubungan dari tipe ini lebih ekonomis untuk arus nominal yang kecil, transformator tegangan tinggi (Gambar 5.48). Jumlah dari lilitan per fasa dan jumlah isolasi minimum karena tegangan fasa

$\frac{1}{\sqrt{3}}$  tegangan jala-jala (Line), juga tidak

ada perubahan fasa antara tegangan primer dengan sekunder. Bila beban pada sisi sekunder dari transformator tidak seimbang, maka tegangan fasa dari sisi beban akan berubah kecuali titik bintang dibumikan.

**Primer:**

$$V_{ph1} = \frac{V_{L1}}{\sqrt{3}} \text{ Volt dan } I_{L1} = I_{ph1}$$

**Sekunder:**

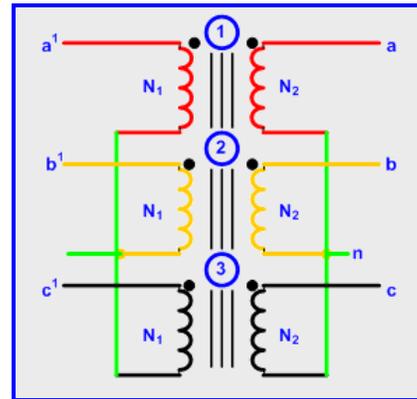
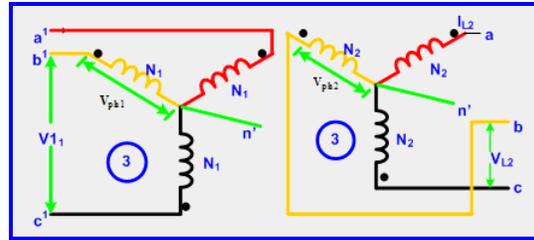
$$V_{ph2} = \frac{V_{L2}}{\sqrt{3}} \text{ Volt dan}$$

$$I_{L2} = I_{ph2} \text{ Amp K} = \frac{V_{ph2}}{V_{ph1}}$$

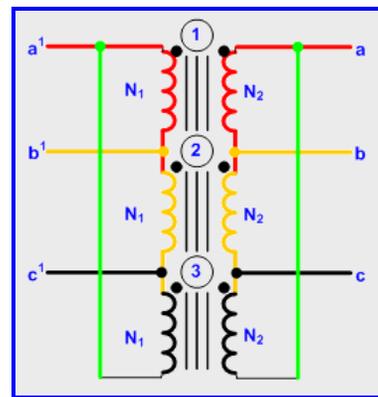
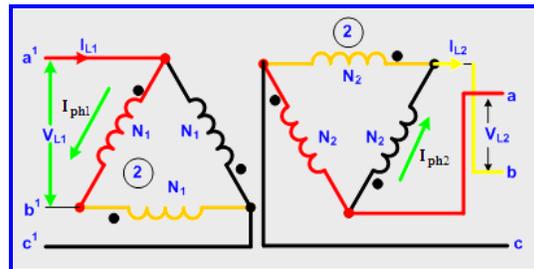
### ◆ Hubungan Segitiga-Segitiga

Hubungan ini umumnya digunakan dalam sistem yang menyalurkan arus besar pada tegangan rendah dan terutama saat kesinambungan dari pelayanan harus dipelihara meskipun satu fasa mengalami kegagalan (Gambar 5.49).

Adapun beberapa keuntungan dari hubungan ini adalah :

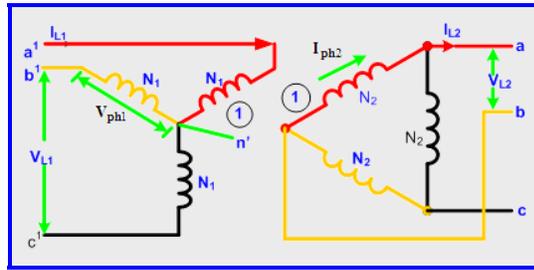


Gambar 5.48 Hubungan Bintang-bintang



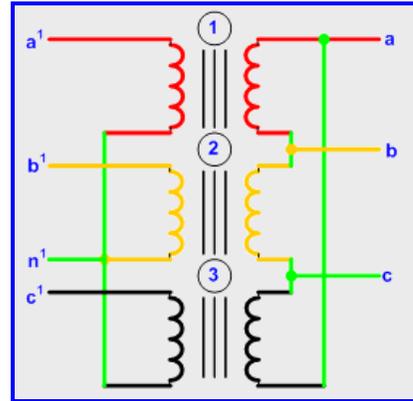
Gambar 5.49 Hubungan Segitiga – Segitiga

- Tidak ada perubahan fasa antara tegangan primer dengan sekunder.
- Luas penampang dari konduktor dikurangi karena arus fasa  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  arus jala-jala
- Tidak ada kesulitan akibat beban tidak seimbang pada sisi sekunder.



Kerugian yang terjadi pada hubungan ini adalah :

- Lebih banyak isolasi dibutuhkan dibandingkan dengan hubungan bintang-bintang.
- Tidak adanya titik bintang memungkinkan, merupakan kerugian yang dapat membahayakan. Bila salah satu jala-jala ke tanah karena kegagalan, tegangan maksimum antara kumparan dan inti akan mencapai tegangan jala-jala penuh.



Gambar 5.50 Hubungan Bintang – Segitiga

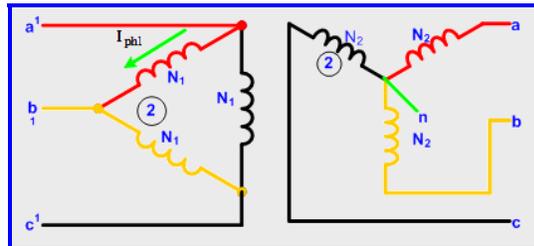
**Primer :**

$$V_{L1} = V_{ph1} \text{ Volt dan } I_{L1} = \sqrt{3}I_{ph1}$$

**Sekunder:**

$$V_{L2} = V_{ph2} \text{ dan } I_{L2} = \sqrt{3}I_{ph2}$$

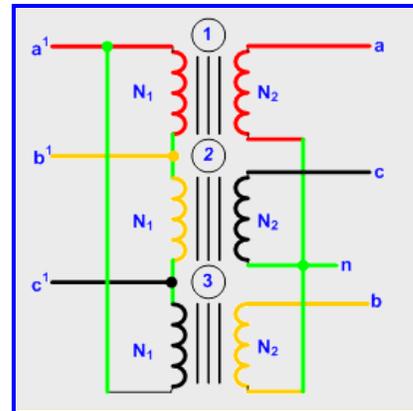
$$K = \frac{V_{ph2}}{V_{ph1}}$$



#### ◆ Hubungan Bintang - Segitiga

Hubungan transformator tipe ini pada prinsipnya digunakan, dimana tegangan diturunkan (Step - Down), seperti pada jaringan transmisi. Pada hubungan ini, perbandingan tegangan jala-jala  $\frac{1}{\sqrt{3}}$

kali perbandingan lilitan transformator dan tegangan sekunder tertinggal 30 ° dari tegangan primer.



Gambar 5.51 Hubungan Segitiga-Bintang

**Primer :**

$$V_{ph1} = \frac{V_{L1}}{\sqrt{3}} \text{ Volt dan } I_{L1} = I_{ph1} \text{ Amp}$$

**Sekunder :**

$$V_{ph2} = V_{L2} \text{ Volt dan } I_{ph2} = \frac{I_{L2}}{\sqrt{3}} \text{ Amp}$$

$$K = \frac{V_{ph2}}{V_{ph1}}$$

◆ **Hubungan Segitiga - Bintang**

Hubungan ini umumnya digunakan, dimana diperlukan untuk menaikkan tegangan (Step-Up), misalnya pada awal sistem transmisi tegangan tinggi. Dalam hubungan ini perbandingan tegangan  $\sqrt{3}$  kali perbandingan lilitan transformator dan tegangan sekunder mendahului sebesar  $30^\circ$ .

**Primer**

$$V_{L1} = V_{ph1} \text{ Volt dan } I_{ph1} = \frac{I_{L1}}{\sqrt{3}} \text{ A}$$

**Sekunder:**

$$V_{ph2} = \frac{V_{L2}}{\sqrt{3}} \text{ Volt dan } I_{L2} = I_{ph2} \text{ A}$$

$$K = \frac{V_{ph2}}{V_{ph1}}$$

**Daya Total Tiga Fasa :**

$$S = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \text{ VA atau } S = 3 \cdot V_{ph} \cdot I_{ph} \text{ VA}$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos\phi \text{ Watt}$$

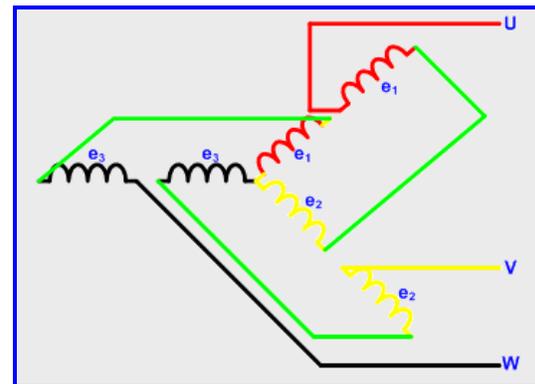
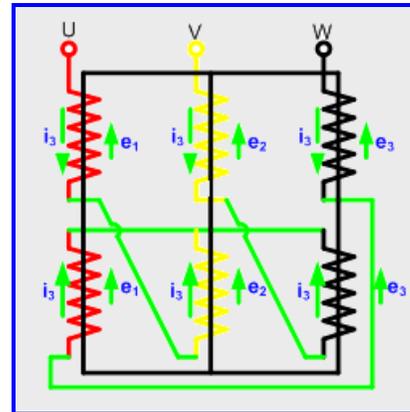
$$Q = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \sin\phi \text{ Var}$$

◆ **Hubungan Zig - Zag**

Kebanyakan transformator distribusi selalu dihubungkan bintang, salah satu syarat yang harus dipenuhi oleh transformator tersebut adalah ketiga fasanya harus diusahakan seimbang. Apabila beban tidak seimbang akan menyebabkan timbulnya tegangan titik bintang yang tidak diinginkan,

karena tegangan pada peralatan yang digunakan pemakai akan berbeda-beda.

Untuk menghindari terjadinya tegangan titik bintang, diantaranya adalah dengan menghubungkan sisi sekunder dalam hubungan Zig-zag. Dalam hubungan Zig-zag sisi sekunder terdiri atas enam kumparan yang dihubungkan secara khusus (Gambar 5.52)



Gambar 5.52 Transformator Tiga Fasa Hubung Zig-zag

Ujung-ujung dari kumparan sekunder disambungkan sedemikian rupa, supaya arah aliran arus didalam tiap-tiap kumparan menjadi bertentangan.

Karena e1 tersambung secara berlawanan dengan gulungan e2, sehingga jumlah vektor dari kedua tegangan itu menjadi :

$$e_{Z1} = e_1 - e_2 \quad ;$$

$$e_{Z2} = e_2 - e_3$$

$$e_{Z3} = e_3 - e_1$$

$$e_{Z1} + e_{Z2} + e_{Z3} = 0 = 3e_b,$$

Teg titik bintang  $e_b = 0$

$$e_1 = \frac{e}{2}, \text{ nilai tegangan fasa } e_z = \frac{e}{2}\sqrt{3}$$

Sedangkan tegangan jala-jala :

$$E_Z = e_Z \sqrt{3} = \frac{e}{2}\sqrt{3}$$

#### ♦ Transformator Tiga Fasa dengan Dua Kumparan

Selain hubungan transformator seperti telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya, ada transformator tiga fasa dengan dua kumparan. Tiga jenis hubungan yang umum digunakan adalah :

- V - V atau "Open  $\Delta$ "
- "Open Y - Open  $\Delta$ "
- Hubungan T - T

Misal Tiga buah transformator satu fasa masing-masing mempunyai daya sebesar 10 KVA, bila dihubungkan V - V (Gambar 5.53) karena salah satu dilepas (sebelumnya dihubungkan segitiga) maka dayanya tidak  $2 \times 10 \text{ KVA} = 20 \text{ KVA}$ , tetapi hanya  $0,866 \times 20 \text{ KVA} = 17,32 \text{ KVA}$ .

Hal ini bisa dibuktikan sebagai berikut :

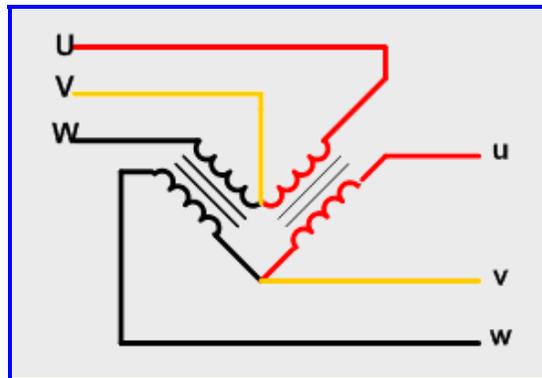
- Daya S saat dihubungkan  $\Delta = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \text{ VA}$
- $I_{ph2} = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$  menjadi arus jala - jala
- Daya S saat dihubungkan V - V  $= \sqrt{3} \cdot V_L \cdot \left( \frac{I_L}{\sqrt{3}} \right) = V_L \cdot I_L \text{ VA}$

- Perbandingan daya saat Hubungan  $\Delta$  dengan V - V adalah :

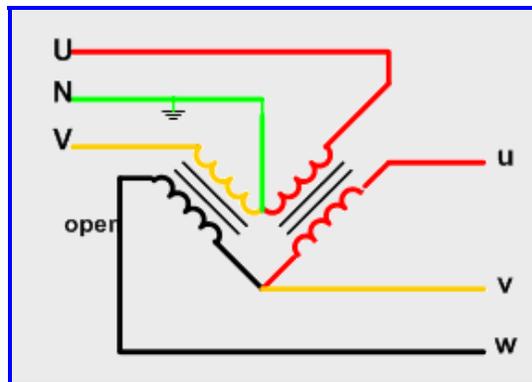
$$\frac{S_{\text{saat V-V}}}{S_{\text{saat } \Delta}} = \frac{V_L \cdot I_L}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 100\% = 57,7\%$$

Kekurangan Hubungan ini adalah :

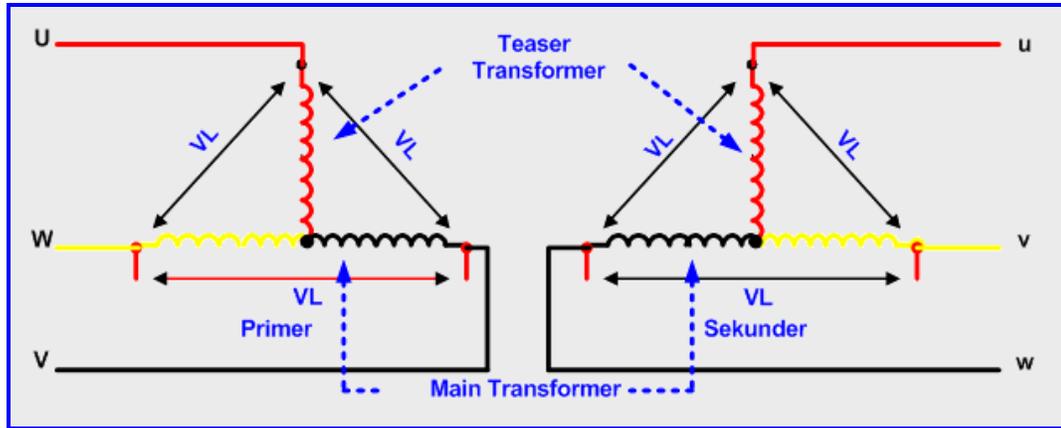
- Faktor daya rata-rata, pada V - V beroperasi lebih kecil dari P.f beban, kira-kira 86,6% dari faktor daya beban seimbang.
- Tegangan terminal sekunder cenderung tidak seimbang, apalagi saat beban bertambah.



Gambar 5.53 Hubungan V-V atau Open  $\Delta$



Gambar 5.54 Hubungan Open Y - Open  $\Delta$



Gambar 5.55 Hubungan Scott atau T-T

Hubungan **Open Y - Open  $\Delta$**  diperlihatkan pada Gambar 5.54, ada perbedaan dari hubungan **V - V** karena penghantar titik tengah pada sisi primer dihubungkan ke netral (ground). Hubungan ini bisa digunakan pada transformator distribusi.

#### ◆ Hubungan Scott atau T - T

Hubungan ini merupakan transformasi tiga fasa ke tiga fasa dengan bantuan dua buah transformator (Kumparan). Satu dari transformator mempunyai "Centre Taps" pada sisi primer dan sekundernya dan disebut "**Main Transformer**". Transformator yang lainnya mempunyai "0,866 Tap" dan disebut "**Teaser Transformer**". Salah satu ujung dari sisi primer dan sekunder "teaser Transformer" disatukan ke "Centre Taps" dari "main transformer".

"Teaser Transformer" beroperasi hanya 0,866 dari kemampuan tegangannya dan kumparan "main transformer" beroperasi pada  $\cos 30^\circ = 0,866$  p.f, yang ekuivalen dengan "main transformer" bekerja pada 86,6 % dari kemampuan daya semunya.

### 5.2.3 Pengujian Transformator Tiga Fasa

Pengujian yang harus dilakukan pada sebuah transformator tiga fasa biasanya disesuaikan dengan kebutuhannya (pengujian rutin, pengujian awal, dan pengujian akhir), jenis pengujiannya juga cukup beragam, seperti :

- ◆ Pengujian Tahanan Isolasi
- ◆ Pengujian Tahanan Kumbaran
- ◆ Pengujian Karakteristik Beban Nol
- ◆ Pengujian Karakteristik Hubung Singkat
- ◆ Pengujian Karakteristik Berbeban
- ◆ Pengujian Perbandingan Transformasi
- ◆ Pengujian Kelompok Hubungan
- ◆ Pengujian Tegangan Terapan
- ◆ Pengujian Tegangan Induksi
- ◆ Pengujian Kebocoran Tangki
- ◆ Pengujian Jenis

#### ◆ Pengujian Tahanan Isolasi

Pengujian tahanan isolasi biasanya dilaksanakan pada awal pengujian dengan tujuan untuk mengetahui secara dini kondisi isolasi transformator, untuk menghindari kegagalan yang bisa bera-

kitab fatal, sebelum pengujian selanjutnya dilakukan.

Pengujian dilaksanakan dengan menggunakan Megger. Tahanan isolasi yang diukur diantaranya :

- Sisi Primer dan Sekunder
- Sisi Primer dan pembumian
- Sisi Sekunder dan pembumian

#### ◆ Pengujian Tahanan Kumparan

Pengujian dilakukan dengan cara melakukan pengukuran tahanan kumparan transformator. Data hasil pengujian digunakan untuk menghitung besarnya rugi tembaga pada transformator tersebut.

#### ◆ Pengujian Karakteristik Beban Nol

Pengujian Karakteristik Beban Nol atau Tanpa Beban dilakukan untuk mengetahui besarnya kerugian daya yang disebabkan oleh rugi *hysterisis* dan *eddy current* pada inti transformator dan besarnya arus yang pada daya tersebut. Pengukuran dilakukan dengan memberikan tegangan nominal pada salah satu sisi transformator dan sisi lainnya dibiarkan dalam keadaan tanpa beban. Contoh untuk menghitung parameter-parameter transformator tiga fasa dari hasil percobaan beban nol bisa dilihat pada **tabel 5.1**. Persamaan yang terlihat pada tabel menandakan dimana alat ukur diletakkan.

#### ◆ Pengujian Karakteristik Hubung Singkat

Pengujian dilakukan dengan cara memberikan arus nominal pada salah satu sisi transformator dan sisi yang lain dihubungkan singkat, dengan demikian akan dibangkitkan juga arus nominal pada sisi yang di hubung singkat. Adapun tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui besarnya rugi daya

yang hilang akibat dari tembaga dari transformator saat beroperasi.

Contoh untuk menghitung parameter-parameter transformator tiga fasa dari hasil percobaan hubung singkat bisa dilihat pada **tabel 5.2** dengan asumsi sisi tegangan rendah di hubung singkat dan alat ukur ada di sisi tegangan tinggi, persamaan yang terlihat pada tabel menunjukkan dimana alat ukur diletakkan.

Tabel 5.1  
Parameter Pengujian Beban Nol

No	Sisi TR Hub Δ	Sisi TT Hub Y
1	$P_{ph} = \frac{P_T}{3}$	$P_{ph} = \frac{P_T}{3}$
2	$V_{ph\ oc} = V_{Loc}$	$V_{phoc} = \frac{V_{oc}}{\sqrt{3}}$
3	$I_{phoc} = \frac{I_{oc}}{\sqrt{3}}$	$I_{phoc} = I_{oc}$
4	Total $P_{h+e} = P_{oc}$	Total $P_{h+e} = P_{oc}$
5	$R_c = \frac{V_{phoc}^2}{P_{oc}/3} = \frac{3 \cdot V_{oc}^2}{P_{oc}}$	$R_c = \frac{V_{phoc}^2}{P_{oc}/3} = \frac{V_{oc}^2/3}{P_{oc}/3}$ $= \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}}$
6	$\cos\phi_{oc} = \frac{P_{oc}}{\sqrt{3} \cdot V_{oc} \cdot I_{oc}}$	$\cos\phi_{oc} = \frac{P_{oc}}{\sqrt{3} \cdot V_{oc} \cdot I_{oc}}$
7	$I_{phoc} = \frac{P_{oc}}{\sqrt{3}} \sin\phi_{oc}$	$I_{phoc} = I_{oc} \cdot \sin\phi_{oc}$
8	$X_m = \frac{V_{phoc}}{I_{phoc}}$	$X_m = \frac{V_{phoc}}{I_{phoc}}$

Ket : OC = Open Circuit = Rang Terbuka = Tanpa Beban

Tabel 5.2  
Parameter Pengujian Hub Singkat

No	Sisi TT Hub Δ	Sisi TT Hub Y
1	$P_{phsc} = \frac{P_{sc}}{3}$	$P_{phsc} = \frac{P_{sc}}{3}$
2	$I_{phsc} = \frac{I_{sc}}{\sqrt{3}}$	$I_{phsc} = I_{sc}$
3	$V_{phsc} = V_{sc}$	$V_{phsc} = \frac{V_{sc}}{\sqrt{3}}$
4	$Z_{eq} = \frac{V_{phsc}}{I_{phsc}}$	$Z_{eq} = \frac{V_{phsc}}{I_{phsc}}$
5	$R_{eq} = \frac{P_{phsc}}{(I_{phsc})^2} = \frac{P_{sc}/3}{(I_{sc}/\sqrt{3})^2}$	$R_{eq} = \frac{P_{phsc}}{(I_{phsc})^2} = \frac{P_{sc}}{3 \cdot I_{sc}^2}$
6	$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$	$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$

Ket : SC = Short Circuit = Hubung Singkat

#### ◆ Pengujian Perbandingan Transformasi

Pengujian perbandingan transformasi atau belitan kumparan adalah untuk mengetahui perbandingan jumlah kumparan sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah pada setiap *tapping* sehingga tegangan keluaran yang dihasilkan oleh transformator sesuai dengan yang spesifikasi/rancangan.

#### ◆ Pengujian Tegangan Terapan

Pengujian tegangan terapan (*Withstand Test*) dilakukan untuk menguji kekuatan isolasi antara kumparan dan rangka tangki. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan tegangan uji sesuai dengan standar uji dan dilakukan pada :

- Sisi tegangan tinggi terhadap sisi tegangan rendah dan rangka tangki yang dibumikan.
- Sisi tegangan rendah terhadap sisi tegangan tinggi dan rangka tangki yang dibumikan.

#### ◆ Pengujian Tegangan Induksi

Tujuan pengujian tegangan induksi adalah untuk mengetahui kekuatan isolasi antara lapisan dari tiap-tiap belitan dan kekuatan isolasi antar belitan transformator. Pengujian dilakukan dengan cara memberi tegangan suplai dua kali tegangan nominal pada salah satu sisi dan sisi lainnya dibiarkan terbuka. Untuk mengatasi kejenuhan pada inti transformator maka frekuensi yang digunakan harus dinaikan sesuai dengan kebutuhan dalam jangka waktu tertentu.

#### ◆ Pengujian Kelompok Hubungan

Vektor tegangan primer dan sekunder sebuah transformator sangat tergantung pada cara melilit kumparannya. Pada transformator Tiga Fasa arah tegangan menimbulkan perbedaan fasa. Arah

dan besar perbedaan fasa tersebut menyebabkan adanya berbagai kelompok hubungan pada transformator.

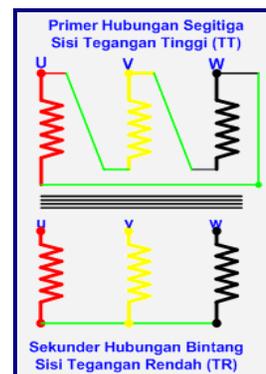
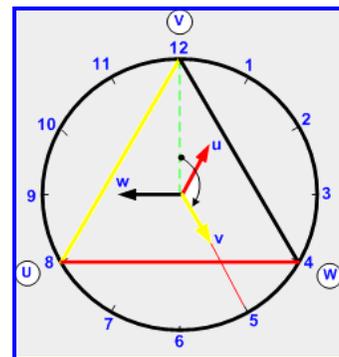
Untuk penentuan kelompok hubungan ini dipergunakan tiga jenis tanda atau kode, yaitu :

◆ Tanda Kelompok sisi tegangan tinggi terdiri atas kode **D**, **Y**, dan **Z**.

◆ Tanda Kelompok sisi tegangan rendah terdiri atas kode **d**, **y**, dan **z**.

Angka jam menyatakan bagaimana letak sisi kumparan tegangan tinggi terhadap sisi tegangan rendah.

Jarum jam panjang dibuat selalu menunjuk **angka 12** dan berimpit dengan Vektor TT tegangan tinggi. Letak Vektor tegangan rendah TH menunjukkan arah jarum jam pendek. Sudut antara jarum jam panjang dan pendek adalah pegeseran antara vektor tegangan tinggi dengan tegangan rendah ( $V$  dan  $v$ ).



Gambar 5.56 Kelompok Hubungan Dy5

Gambar 5.56 memperlihatkan contoh kelompok hubungan sebuah transformator tiga fasa **Dy5**, artinya *sisi primer dihubungkan segitiga (jam 12)* dan *sisi sekunder dihubungkan bintang (jam 5)*.

Untuk memudahkan, pabrik-pabrik pada pelaksanaannya membatasi jumlah kelompok hubungan dengan membuat normalisasi pada kelompok hubungan yang dianggap baku.

Standardisasi yang banyak diikuti adalah menurut peraturan Jerman, yaitu VDE 0532 (lihat tabel 5.3).

Kelompok hubungan yang disarankan untuk digunakan adalah **Yy0**, **Dy5**, **Yd5**, dan **Yz5**, pada tabel diberi tanda garis pinggir warna merah.

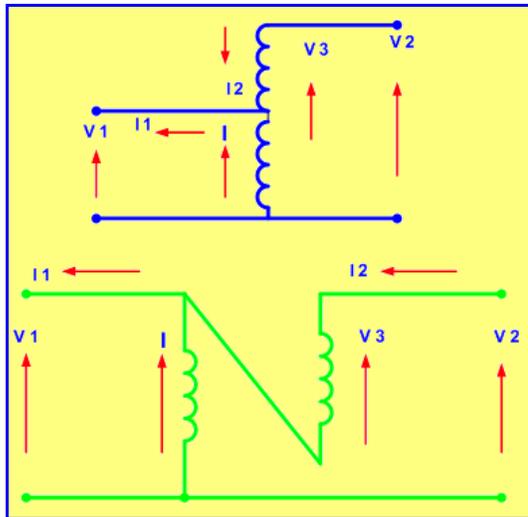
Tabel 5.3 Kelompok Hubungan Menurut Standar VDE 0532

Angka Jam	Kelompok Hubungan	Tegangan Tinggi (TT)	Tegangan Rendah (TR)	Hubungan Lilitan TT	Hubungan Lilitan TR	Perb Lilitan a
0	Dd0					$\frac{N_1}{N_2}$
	Yy0					$\frac{N_1}{N_2}$
	Dz0					$\frac{2N_1}{3N_2}$
5	Dy5					$\frac{N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2}$
	Yd5					$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$
	Yz5					$\frac{2N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2}$
6	Dd6					$\frac{N_1}{N_2}$
	Yy6					$\frac{N_1}{N_2}$
	Dz6					$\frac{2N_1}{3N_2}$
11	Dy11					$\frac{N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2}$
	Yd11					$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$
	Yz11					$\frac{2N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2}$

## 5.3 Transformator Khusus

### 5.3.1 Autotransformator

Autotransformator adalah transformator yang hanya terdiri dari satu kumparan yang hanya berfungsi sebagai sisi primer dan sekunder (Gambar 5.57).



Gambar 5.57 Rangkaian Autotransformator

Bila tegangan pada sisi primer  $V_1$  dan arus  $I_1$ , tegangan pada sisi sekunder  $V_2$  dan arus  $I_2$ . daya semu bisa mencerminkan banyaknya bahan yang digunakan untuk pembuatan transformator tersebut.

Besaran tegangan merupakan ukuran mengenai banyaknya inti yang dipakai, sedangkan arus berbanding lurus dengan banyaknya kawat tembaga yang dipakai dalam pembuatan transformator tersebut.

Pada transformator “biasa” yang terdiri dari dua kumparan yang terpisah secara listrik, banyaknya bahan yang diguna-

kan untuk primer dan sekunder bisa diperkirakan dengan persamaan :

$$S_{tb} = V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_2$$

Bila kerugian-kerugian didalam transformator dapat diabaikan, maka untuk pendekatan, persamaan untuk transformator biasa adalah :

$$S_{tb} = 2 \cdot V_1 \cdot I_1 \approx 2 \cdot V_2 \cdot I_2$$

untuk autotransformator pendekatannya adalah :

$$S_{tA} = V_1 \cdot I + V_3 \cdot I_2$$

sedangkan :

$$I_1 = I + I_2 \quad , \text{ maka } I = I_1 - I_2$$

maka :

$$\begin{aligned} S_{tA} &= V_1(I_1 - I_2) + (V_2 - V_1)I_2 \\ &= V_1 \cdot I_1 - V_1 \cdot I_2 + V_2 \cdot I_2 - V_1 \cdot I_2 \\ &= V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_2 - 2 \cdot V_1 \cdot I_2 \end{aligned}$$

bila rugi-rugi diabaikan maka dapat ditulis :

$S_{tA} \approx 2 \cdot V_1 \cdot I_1 - 2 \cdot V_1 \cdot I_2 \approx 2 \cdot V_2 \cdot I_2 - 2 \cdot V_1 \cdot I_2$   
Perbandingan antara daya Autotransformator  $S_{tA}$  dengan daya tipe sebagai transformator biasa  $S_{tb}$ , adalah :

$$\frac{S_{tA}}{S_{tb}} = \frac{2 \cdot V_2 \cdot I_2 - 2 \cdot V_1 \cdot I_2}{2 \cdot V_2 \cdot I_2} = \frac{V_2 - V_1}{V_2} = 1 - \frac{V_1}{V_2}$$

dari persamaan diatas dapat dilihat untuk nilai  $V_1$  dan  $V_2$  yang tidak jauh berbeda, misalnya  $V_1 : V_2 = 0,9$ ,

maka perbandingan  $\frac{S_{tA}}{S_{tb}} = 1 - 0,9 = 0,1$  ini

menunjukkan dengan menggunakan autotransformator diperlukan bahan 10% lebih hemat daripada transformator biasa.

Autotransformator banyak digunakan di:

- Industri untuk alat pengasut (start) motor induksi tiga fasa rotor sangkar.

- Rumah-rumah untuk menaikkan tegangan yang tidak sesuai dengan kebutuhan peralatan listrik rumah tangga.

### 5.3.2 Transformator Pengukuran

Untuk melakukan pengukuran tegangan atau arus yang berada di gardu-gardu listrik atau pusat pembangkit tenaga listrik biasanya tidak dilakukan secara langsung karena karena nilai arus/ tegangan yang harus diukur pada umumnya tinggi. Apabila pengukuran besaran-besaran listrik ini dilakukan secara langsung, maka alat-alat ukur yang harus disediakan akan menjadi sangat mahal karena baik dari ukuran fisik maupun ratingnya memerlukan perancangan secara khusus.

Untuk mengatasi hal tersebut maka yang dibuat secara khusus bukan alat ukurnya, melainkan transformatornya, dengan cara ini harganyapun relatif lebih murah bila dibandingkan dengan pembuatan alat ukur khusus.

Transformator khusus ini disebut transformator pengukuran (instrumen). Ada dua jenis transformator pengukuran, yaitu :

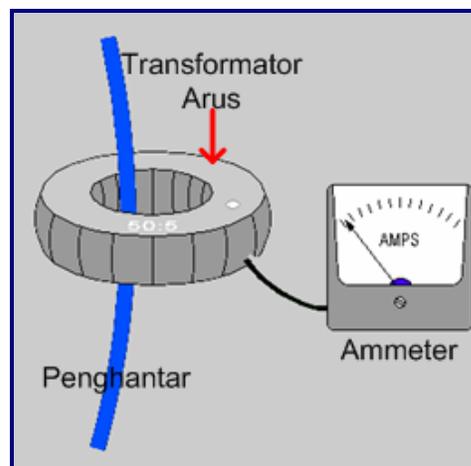
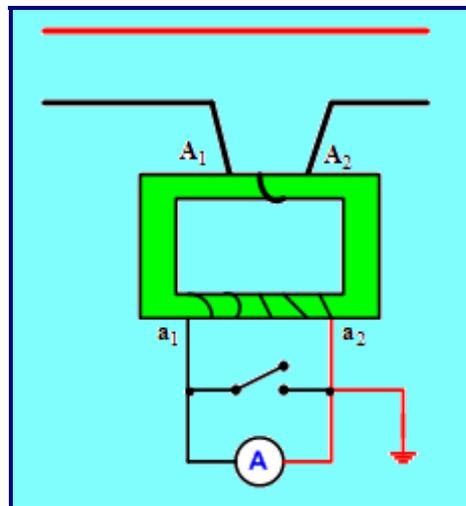
1. Transformator Arus yang menurunkan arus menurut perbandingan tertentu.
2. Transformator tegangan yang menurunkan tegangan menurut perbandingan tertentu.

#### 5.3.2.1 Transformator Arus

Transformator arus (Gambar 5.58) digunakan untuk mengukur arus beban pada sebuah rangkaian. Dengan penggunaan transformator arus, maka arus

beban yang besar dapat diukur hanya dengan menggunakan Ampermeter yang rangenya tidak terlalu besar.

Bila sebuah transformator arus mempunyai perbandingan 100/5 A., artinya transformator mengubah arus primer dari 100 A menjadi 5A di sisi sekunder. Karena pada sisi primer selalu mengalir arus yang besar, maka sisi sekunder harus selalu dalam keadaan tertutup, bila terbuka maka transformator akan mengalami kerusakan, hal ini disebabkan karena tidak adanya fluks yang bersal dari sisi sekunder.



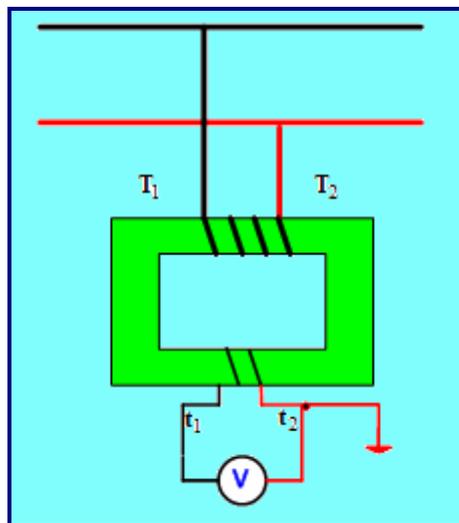
Gambar 5.58 Transformator Arus

### 5.3.2.2 Transformator Tegangan

Prinsip kerja transformator tegangan sebenarnya sama dengan sebuah transformator biasa, yang membedakannya adalah dalam perbandingan transformasinya, dimana transformator tegangan memiliki ketelitian yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan transformator biasa. Transformator tegangan biasanya mengubah tegangan tinggi menjadi tegangan rendah.

Misalnya pada sebuah Gardu distribusi yang mempunyai tegangan 20 KV dengan transformator tegangan diturunkan menjadi 200 Volt yang digunakan untuk pengukuran.

Untuk mencegah terjadinya perbedaan tegangan yang besar antara kumparan primer dengan sekunder, karena adanya kerusakan isolasi pada kumparan primer., maka pada sisi sekunder perlu dipasang pembumian.



Gambar 5.59 Transformator Tegangan

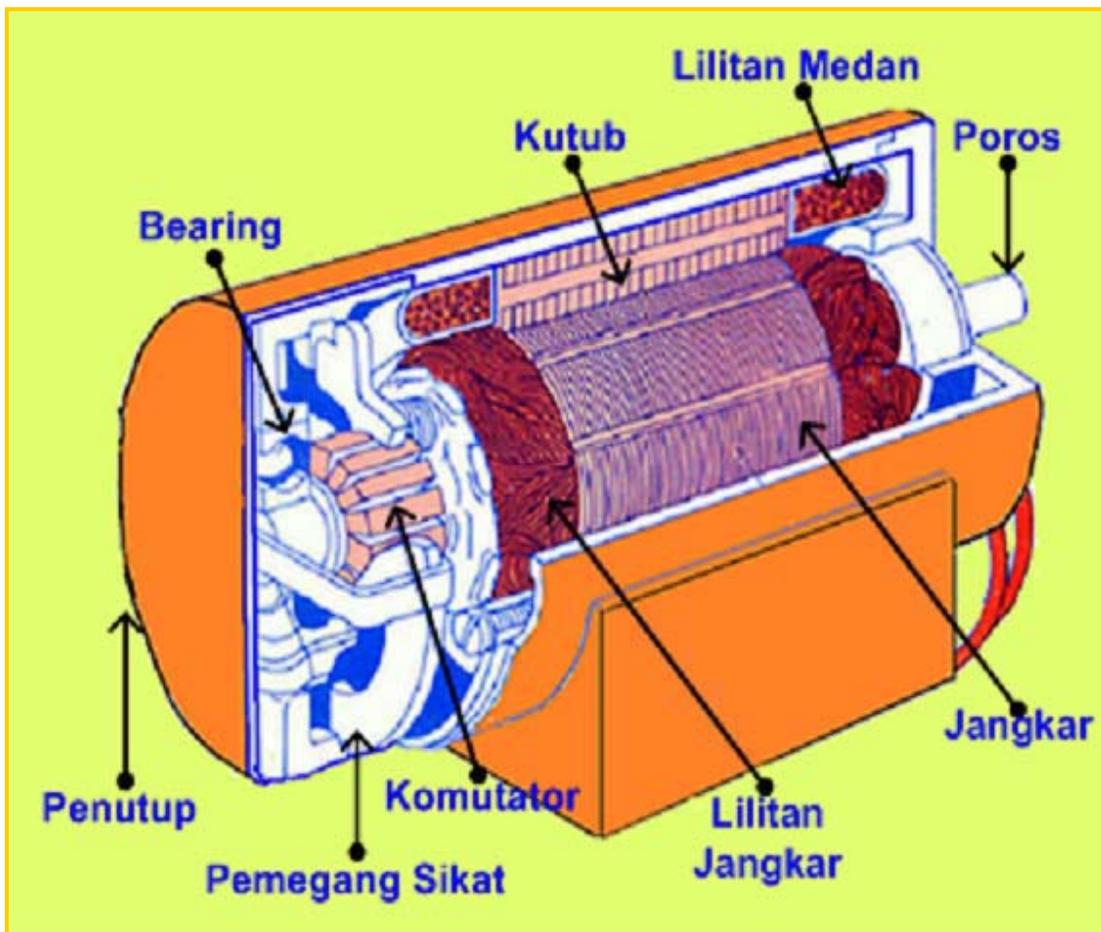
## 5.4 Generator Arus Searah

### 5.4.1 Konstruksi Mesin Arus Searah

Ada tiga hal pokok yang menjadi dasar kerja sebuah mesin listrik, yaitu :

- Adanya fluks magnet yang dihasilkan oleh kutub-kutub magnet.

- Adanya kawat penghantar listrik, yang merupakan tempat terbentuknya gaya gerak listrik (Ggl) atau aliran arus listrik.
- Gerakan relatif antara fluks magnet dengan kawat penghantar listrik. Dalam hal ini boleh magnitnya tetap, sedangkan kawat penghantarnya yang bergerak atau sebaliknya.



Gambar 5.60 Konstruksi Mesin Arus Searah

Konstruksi sebuah Mesin Arus Searah dapat dibagi atas :

**Bagian Stator :**

- Rangka generator atau Motor
- Inti kutub magnet dan Lilitan Penguat Magnet
- Sikat Komutator

**Bagian Rotor**

- Komutator
- Jangkar
- Lilitan Jangkar

**5.4.1.1 Rangka ( Frame )**

Fungsi utama dari rangka mesin adalah sebagai bagian dari tempat mengalirnya fluks; magnet. Karena itu rangka mesin dibuat dari bahan ferromagnetik. Selain itu rangkapun berfungsi untuk meletakkan alat-alat tertentu dan melindungi bagian-bagian mesin lainnya.

Mesin-mesin yang kecil rangkanya dibuat dari besi tuang, sedangkan mesin-mesin yang besar rangkanya dibuat dari plat campuran baja yang berbentuk selinder.

**5.4.1.2 Inti Kutub Magnet dan Lilitan Penguat Magnet**

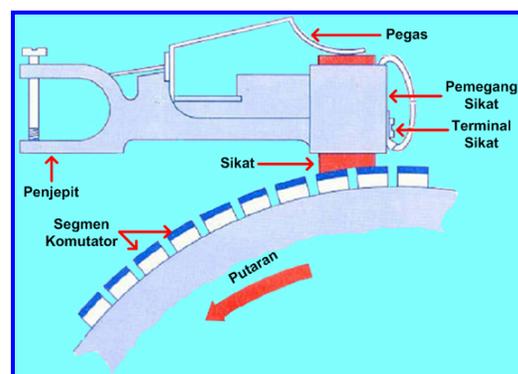
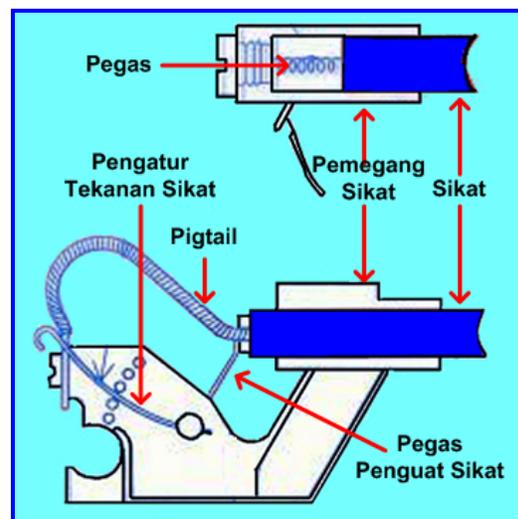
Fluks magnet yang terdapat pada mesin listrik dihasilkan oleh kutub-kutub magnet. Kutub magnet diberi lilitan penguat magnet yang berfungsi untuk tempat aliran arus listrik supaya terjadi proses elektromagnetisme.

Pada dasarnya kutub magnet terdiri dari dua bagian pokok, yaitu inti kutub magnet dan sepatu kutub magnet. Karena kutub magnet berfungsi menghasilkan fluks magnet, maka kutub magnet dibuat dari bahan ferromagnetik, misalnya campuran baja-silikon. Disamping itu, kutub magnet dibuat dari

bahan berlapis-lapis tipis untuk mengurangi panas karena adanya arus pusar yang terbentuk pada kutub magnet buatan tersebut.

**5.4.1.3 Sikat Komutator**

Fungsi utama sikat adalah sebagai penghubung untuk aliran arus dari lilitan jangkar ke terminal luar (generator) atau dari terminal luar ke lilitan jangkar (Motor). Karena itu sikat sikat dibuat dari bahan konduktor. Disamping itu sikat juga berfungsi untuk terjadinya komutasi, bersama-sama dengan komutator, bahan sikat harus lebih lunak dari bahan komutator.



Gambar 5.61 Konstruksi Sikat Komutator

Supaya hubungan/kontak antara sikat-sikat yang diam dengan komutator yang berputar dapat sebaik mungkin, maka sikat memerlukan alat pemegang dan penekan berupa per/pegas yang dapat diatur.

Memilih bahan yang digunakan untuk suatu sikat, perlu memperhatikan :

- Putaran mesin;
- Kerapatan arus yang melalui sikat;
- Tekanan sikat terhadap komutator.

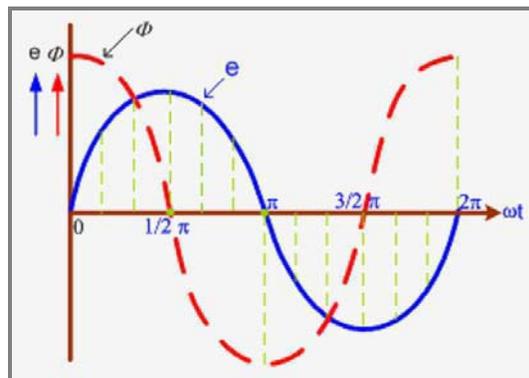
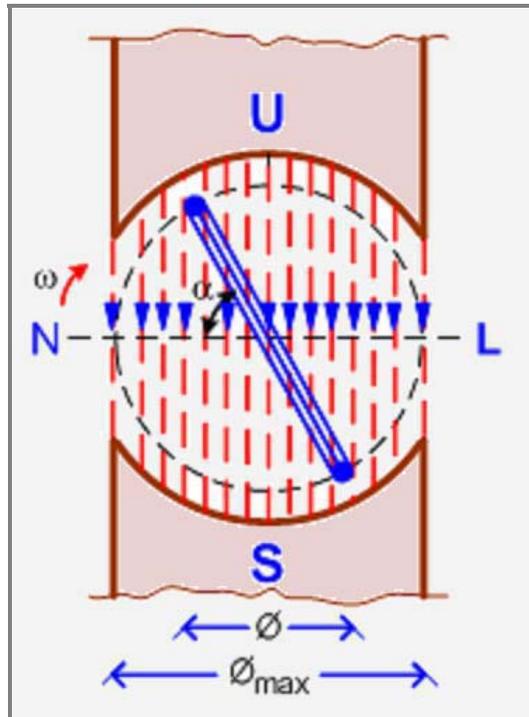
#### 5.4.1.4 Komutator

Seperti diketahui komutator berfungsi sebagai alat penyearah mekanik, yang bersama-sama dengan sikat membentuk suatu kerjasama yang disebut komutasi.

Supaya menghasilkan penyearah yang lebih baik, maka komutator yang digunakan jumlahnya banyak. Karena itu tiap belahan/segmen komutator tidak lagi merupakan bentuk sebagian selinder, tetapi sudah berbentuk lempeng-lempeng. Diantara setiap lempeng/ segmen komutator terdapat bahan isolator. Isolator yang digunakan menentukan kelas dari mesin berdasarkan kemampuan suhu yang timbul dalam mesin tersebut.

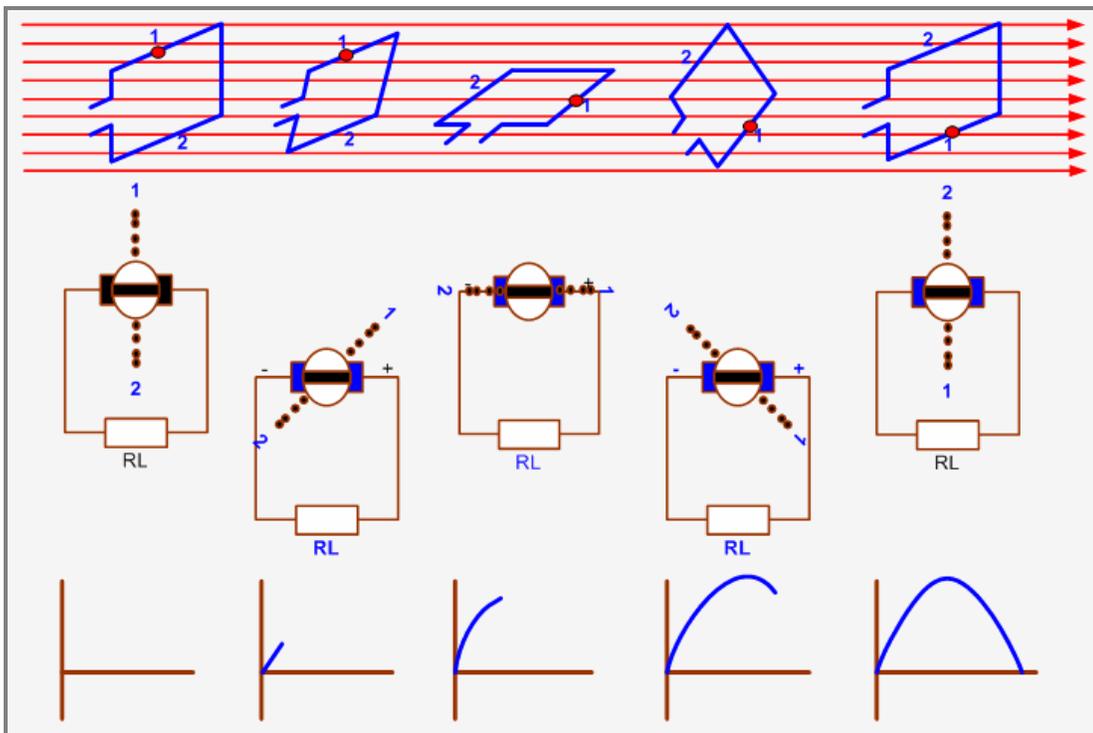
Jadi disamping sebagai isolator terhadap listrik isolator yang digunakan harus mampu terhadap panas tersebut. Berdasarkan jenis isolator yang digunakan terhadap kemampuan panas ini maka mesin DC dikenal atas :

- Kelas A : Maks  $70^{\circ} \text{C}$
- Kelas B : Maks  $110^{\circ} \text{C}$
- Kelas H : Maks  $185^{\circ} \text{C}$



Gambar 5.62 Proses Terbentuknya Ggl pada Sisi Kumputan Generator

Tegangan yang dibangkitkan pada sisi kumparan sebuah generator arus searah, sebenarnya adalah dalam bentuk gelombang arus bolak balik, selanjutnya komutator akan mengubah menjadi arus searah. Proses perubahan arus bolak-balik menjadi arus searah oleh komutator bisa dijelaskan sebagai berikut :



Gambar 5.63 Proses Penyearahan Tegangan pada Generator Arus Searah

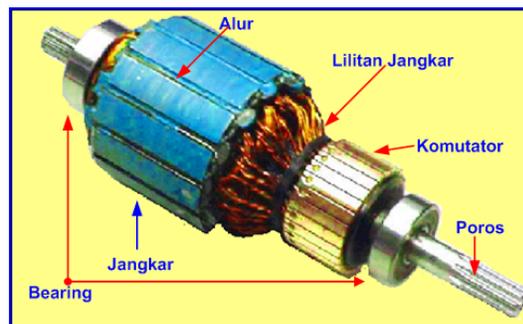
Komutator 1 dihubungkan dengan sisi kumparan 1 dan Komutator 2 dengan sisi kumparan 2. Jadi kalau kumparan berputar, maka sikat komutator akan bergesekan dengan komutator secara bergantian. Peristiwa pergesekan/perpindahan sikat dari satu komutator ke komutator berikutnya biasa disebut komutasi. Peristiwa komutasi inilah yang menyebabkan terjadinya penyearahan.

#### 5.4.1.5 Jangkar

Jangkar yang umum digunakan dalam mesin arus searah adalah yang berbentuk silinder, yang diberi alur pada bagian permukaannya untuk melilitkan kumparan-kumparan tempat terbentuknya Ggl imbas.

Jangkar dibuat dari bahan yang kuat yang mempunyai sifat ferromagnetik

dengan permeabilitas yang cukup besar, dengan maksud agar kumparan jangkar terletak dalam daerah yang imbas magnetnya besar sehingga ggl yang terbentuk dapat bertambah besar.

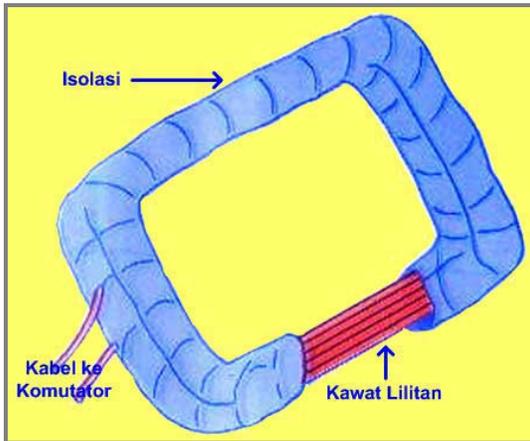


Gambar 5.64 Jangkar Generator Arus Searah

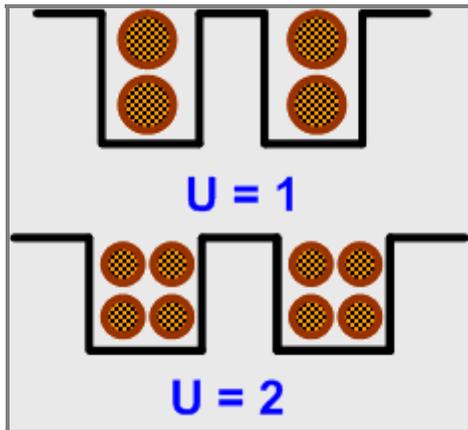
#### ➤ Lilitan Jangkar

Lilitan jangkar berfungsi sebagai tempat terbentuknya Ggl imbas. Lilitan jangkar

terdiri atas beberapa kumparan yang dipasang di dalam alur jangkar. Tiap-tiap kumparan dapat terdiri atas lilitan kawat atau lilitan batang.



Gambar 5.65 Lilitan Jangkar



Gambar 5.66 Letak Sisi-sisi Kumparan dalam Alur

$Z$  = Jumlah penghantar/kawat jangkar atau batang jangkar.

$Z_s$  = Jumlah kawat tiap sisi kumparan

$S$  = Jumlah sisi kumparan.

Tiap-tiap kumparan mempunyai dua sisi kumparan dan jumlahnya harus genap. Pada tiap-tiap alur bisa dipasang dua sisi kumparan atau lebih dalam dua lapisan bertumpuk (Gambar 5.66). Dalam tiap-tiap alur terdapat  $2U$  sisi kumparan, maka jumlah alur  $G$  adalah :

$$G = \frac{S}{2U}$$

Bila dalam tiap-tiap kutub mempunyai 8 s/d 18 alur, maka :

$$G = (8 - 18) 2p$$

Tiap-tiap kumparan dihubungkan dengan kumparan berikutnya melalui lamel komutator, sehingga semua kumparan dihubungkan seri dan merupakan rangkaian tertutup. Tiap-tiap lamel dihubungkan dengan dua sisi kumparan sehingga jumlah lamel  $k$ , adalah :

$$S = 2 \cdot k$$

$$\frac{Z}{Z_s} = 2 \cdot k$$

$$k = \frac{Z}{2 \cdot Z_s}$$

Bila dalam tiap-tiap alur terdapat dua sisi kumparan ( $U = 1$ ) maka jumlah lamel juga sama dengan jumlah alur

$$G = \frac{S}{2 \cdot U} = \frac{2 \cdot k}{2 \cdot u} \Rightarrow k = U \cdot G$$

#### ❖ Lilitan Gelung

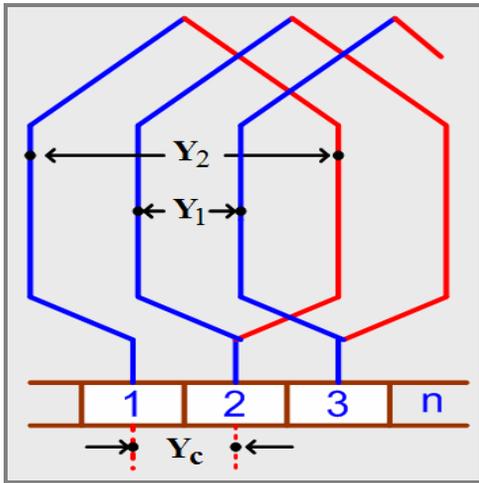
Jika kumparan dihubungkan dan dibentuk sedemikian rupa sehingga setiap kumparan menggantung kembali ke sisi kumparan berikutnya maka hubungan itu disebut lilitan gelung. Perhatikan gambar 5.67 Prinsip Lilitan gelung.

$Y$  = *kisar lilitan*, yang menyatakan jarak antara lamel permulaan dan lamel berikutnya melalui kumparan.

$Y_C$  = *kisar komutator*, jumlah lamel yang melalui komutator.

$Y_1, Y_2$  = *kisar bagian*.

$$Y = Y_1 + Y_2 = 2 \cdot Y_C$$



Gambar 5.67 Prinsip Lilitan Gelung

Pada lilitan gelung kisar bagian  $Y_2$  mundur atau negatif. Tiap kumparan mempunyai satu sisi bernomor ganjil dan satu sisi bernomor genap, karena itu  $Y_1$  dan  $Y_2$  selamanya harus merupakan bilangan ganjil.

Kisar bagian  $Y_1$  ditetapkan oleh lebar kumparan, diperkirakan sama dengan jarak kutub-kutub. Bila lebar kumparan dinyatakan dengan jumlah alur, biasanya dinyatakan dengan kisar  $Y_g$ .

$$Y_g = \frac{G}{2p} \Rightarrow Y_g < \frac{G}{2p}$$

Kisar bagian  $Y_1$  biasanya dinyatakan dengan sejumlah sisi kumparan yang harus dilalui supaya dari sisi yang satu sampai pada sisi berikutnya. Di dalam tiap-tiap alur dimasukkan sisi kumparan  $2U$  dan secara serempak beralih dari lapisan atas ke lapisan bawah karena itu

$$Y_1 = 2 \cdot U \cdot Y_g + 1$$

Kisar bagian  $Y_1$  menentukan cara menghubungkan ujung kumparan yang satu dengan kumparan berikutnya melalui lamel komutator, kisar  $Y_2$  biasa

disebut juga **kisar hubung**.

$$Y_2 = 2 \cdot Y_c - Y_1$$

Contoh :

$2p = 2, G = k = 8, S = 16$ , dan  $U = 1$   
rencanakan lilitan gelung tunggalnya :

$$Y_g = \frac{G}{2p} = \frac{8}{2} = 4 \quad Y_c = 1$$

$$Y_1 = 2 \cdot U \cdot Y_g + 1 = 2 \cdot 1 \cdot 4 + 1 = 9$$

$$Y_2 = 2 \cdot Y_c - Y_1 = 2 \cdot 1 - 9 = -7$$

Tabel 5.4  
Hubungan Sisi Kumparan dengan Lamel Lilitan Gelung

LAMEL	SISI KUMPARAN	LAMEL
1	1 - 10	2
2	3 - 12	3
3	5 - 14	4
4	7 - 16	5
5	9 - 2	6
6	11 - 4	7
7	13 - 6	8
8	15 - 8	1

#### ❖ Lilitan Gelung Majemuk

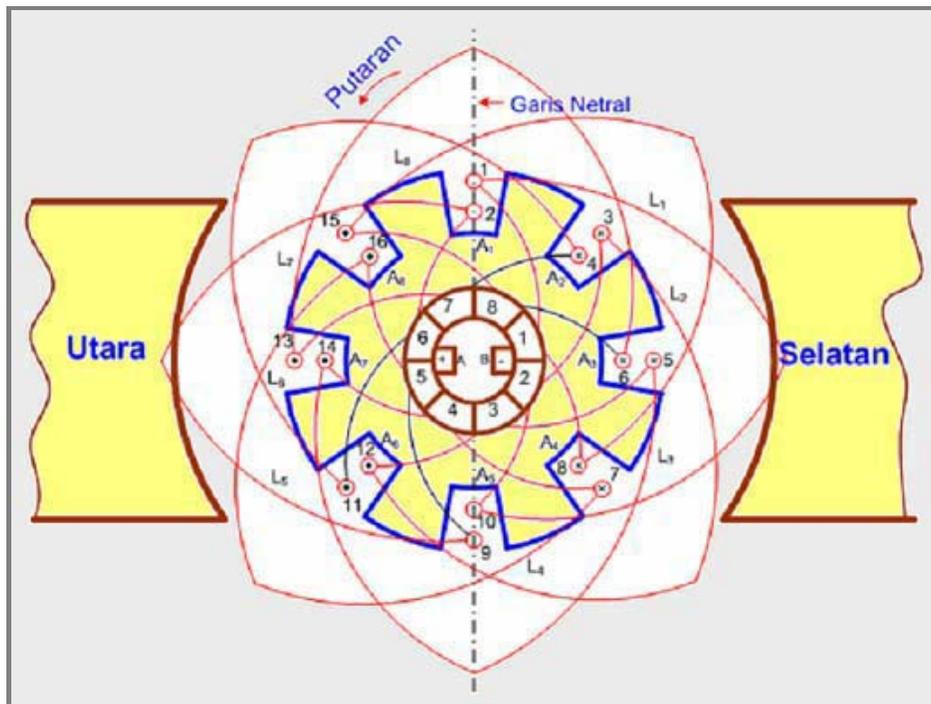
Lilitan Gelung Majemuk terdiri dari dua lilitan gelung tunggal atau lebih yang dililit secara simetris antara yang satu dengan yang lainnya. Pada lilitan gelung tunggal banyaknya cabang paralel sama dengan banyaknya jumlah kutub ( $2p$ ) dari mesin tersebut, sedangkan pada lilitan gelung majemuk yang mempunyai  $m$  gelung tunggal, banyaknya cabang paralel adalah:

$$a = m \cdot p$$

$$Y_c = m$$

$$Y_2 = 2 \cdot m - Y_1$$

sedangkan untuk menentukan  $Y_1$  sama seperti pada lilitan gelung tunggal. Untuk mendapatkan lilitan gelung majemuk tertutup ujung lilitan terakhir harus kembali lagi ke lamel permulaan.



Gambar 5.68 Lilitan Gelung Tunggal

❖ **Lilitan Gelombang**

$$Y_c = \frac{k \pm 1}{p}$$

**Lilitan Gelombang Tunggal**

Pada lilitan gelombang kisar komutator  $Y_c$  lebih besar bila dibandingkan dengan  $Y_c$  pada lilitan gelung .

Contoh :

$$2p = 4 ; S = 42 ; G = k = 21 ; u = 1$$

$$Y_c = \frac{21+1}{2} \Rightarrow Y_c = 10 \text{ atau } 11,$$

**kita ambil  $Y_c = 10$**

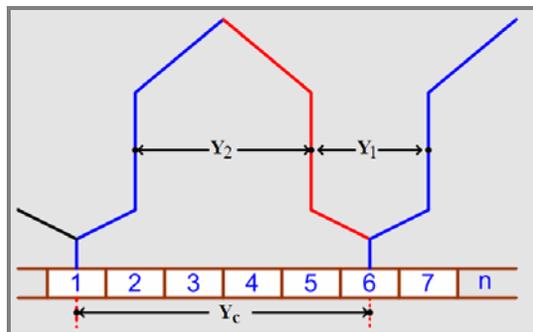
$$Y_G = \frac{G}{2p} = \frac{21}{4} = 5 \frac{1}{4},$$

**kita bulatkan menjadi 5**

$$Y_1 = 2 \cdot u \cdot Y_G + 1 = 2 \cdot 1 \cdot 5 + 1 = 11$$

dan

$$Y_2 = 2 \cdot Y_c - Y_1 = 2 \cdot 10 - 11 = 9$$



Gambar 5.69 Prinsip Lilitan Gelombang

Kisar bagian pada lilitan gelombang mempunyai nilai positif(maju).

Tabel 5.5  
Hubungan Sisi Kumparan dengan Lamel Lilitan Gelombang

LAMEL	SISI KUMPARAN	LAMEL
1	1 - 12	11
11	21 - 32	21
21	41 - 10	10
10	19 - 30	20
20	39 - 8	9
9	17 - 28	19
19	37 - 6	8
8	15 - 26	18
18	35 - 4	7
7	13 - 24	17
17	33 - 2	6
6	11 - 22	16
16	31 - 42	5
5	9 - 20	15
15	29 - 40	4
4	7 - 18	14
14	27 - 38	3
3	5 - 16	13
13	25 - 36	2
2	3 - 14	12
12	23 - 34	1

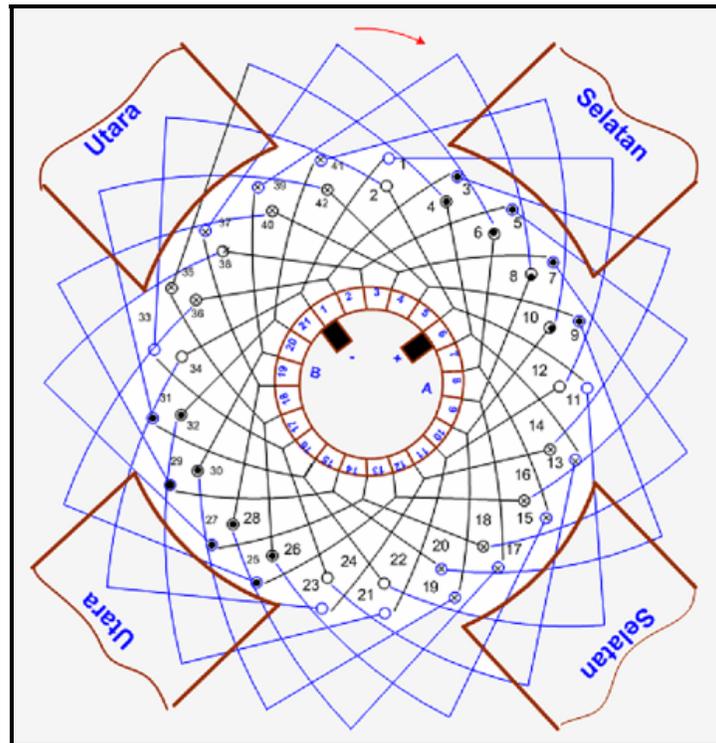
Pada lilitan gelombang tunggal banyaknya sikat yang dibutuhkan hanya dua buah, tidak tergantung pada jumlah kutubnya.

### Lilitan Gelombang Majemuk

Apabila nilai arus atau tegangan yang diperlukan tidak bisa dipenuhi dengan lilitan gelung atau gelombang tunggal, maka diatasi dengan lilitan gelombang majemuk.

Lilitan gelombang majemuk terdiri dari dua lilitan gelombang tunggal atau lebih. Tiap-dap lilitan gelombang tunggal terdiri dari dua cabang paralel, untuk gelombang majemuk  $a = 2 \cdot m$

$$Y_c = \frac{k \pm m}{p}$$



Gambar 5.70 Lilitan Gelombang Tunggal

Berdasarkan penjelasan diatas maka dapat dilihat perbedaan-perbedaan yang terdapat pada lilitan gelung dan gelombang yaitu :

#### Lilitan Gelung

1. Untuk generator bertegangan rendah, arus besar.
2. Ujung-ujung kumparan disambung pada lamel yang berdekatan.
3. Pada lilitan gelung tunggal, arus yang mengalir pada jangkar terbagi sesuai dengan jumlah kutub.
4. Pada lilitan gelung majemuk, arus yang mengalir terbagi sesuai dengan rumusan  $a = m \cdot p$ .
5. Sisi kumparan terbagi pada dua bagian, yaitu terletak dihadapan kutub utara dan kutub selatan.

#### Lilitan Gelombang

1. Untuk generator bertegangan tinggi, arus rendah.
2. Pada lilitan gelombang tunggal ujung-ujung kumparan dihubungkan pada lamel komutator dengan jarak mendekati  $360^\circ$  Listrik.
3. Jumlah cabang paralel pada lilitan gelombang tunggal adalah 2 (dua), walaupun jumlah kutubnya  $> 2$ .
4. Pada lilitan gelombang tunggal penghantar-penghantar pada masing-masing cabang, diletakkan terbagi rata pada seluruh permukaan kutub-kutubnya.
5. Lilitan gelombang majemuk digunakan jika dengan lilitan gelung atau gelombang tunggal arus atau tegangan yang diperlukan tidak tercapai.

### 5.4.2 Tegangan Induksi

**Tegangan Induksi jangkar atau Ggl Jangkar** dibangkitkan pada kumparan-kumparan jangkar dari sebuah generator. Nilai tegangan ini bisa

dihitung berdasarkan persamaan-persamaan dibawah ini :

$\phi$  = Fluks per kutub dalam Weber  
 $Z$  = Jumlah penghantar (kawat) dari  
 = Jumlah Alur (G) x Jumlah penghantar per alur

$2p$  = Jumlah kutub pada generator  
 $a$  = Banyaknya cabang paralel  
 $N$  = Putaran jangkar dalam Rpm  
 $E$  = Tegangan yang diinduksikan pada jangkar dalam Volt.

Ggl rata-rata yang diinduksikan pada tiap penghantar =  $\frac{d\phi}{dt}$  Volt

Fluks terpotong per penghantar dalam satu putaran,  $d\phi = \phi \cdot P$  Weber

Jumlah putaran /detik =  $\frac{N}{60}$  - N

Waktu untuk satu putaran,

$$dt = \frac{60}{N}$$

Ggl Induksi/penghantar

$$= \frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi \cdot P \cdot N}{60} \text{ V}$$

#### Untuk Lilitan Gelombang

Jumlah cabang paralel = 2  
 Jumlah penghantar terhubung seri dalam satu cabang =  $\frac{Z}{2}$

$\therefore$  Ggl Induksi/Cabang

$$= \frac{\phi \cdot P \cdot N}{60} \times \frac{Z}{A}$$

$$= \frac{\phi \cdot Z \cdot P \cdot N}{120} \text{ Volt}$$

#### Untuk Lilitan Gelung

Jumlah cabang paralel = a  
 Jumlah penghantar terhubung seri dalam satu cabang =  $\frac{Z}{a}$

$$\begin{aligned} \text{Ggl Induksi/cabang} \\ = \frac{\phi \cdot P \cdot N}{60} \times \frac{Z}{a} \text{ Volt} \end{aligned}$$

Rumus secara umum untuk Ggl Induksi pada jangkar,

$$E = \frac{\phi \cdot Z \cdot N}{60} \times \frac{Z}{a} \text{ Volt}$$

### 5.4.3 Reaksi Jangkar

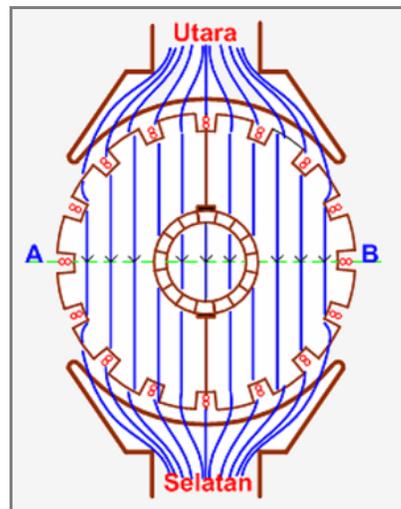
**Fluks** magnet yang ditimbulkan oleh kutub-kutub utama dari sebuah generator saat tanpa beban disebut **Fluks Medan Utama** (Gambar 5.71).

Fluks ini memotong belitan jangkar sehingga timbul tegangan induksi, bila generator dibebani maka pada penghantar jangkar timbul arus jangkar. arus jangkar ini menyebabkan timbulnya fluks pada penghantar jangkar tersebut dan biasa disebut **Fluks Medan Jangkar** (Gambar 5.72).

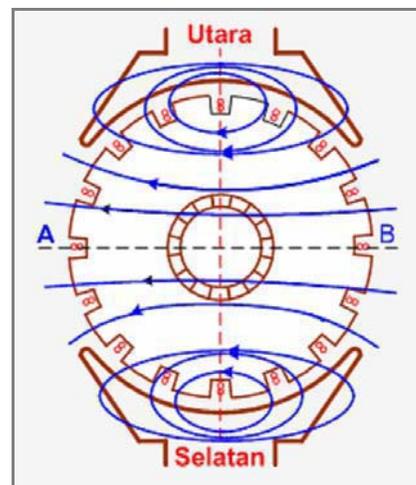
Selanjutnya perhatikan gambar 5.73, disini terlihat fluks medan utama disebelah kiri kutub utara dilemahkan oleh sebagian fluks medan lintang (jangkar) dan disebelah kanan diperkuat. Sedangkan pada kutub selatan fluks medan utama disebelah kanan diperlemah dan disebelah kiri diperkuat oleh fluks medan lintang. Pengaruh adanya interaksi ini disebut **reaksi jangkar**.

Reaksi jangkar ini mengakibatkan medan utama tidak tegak lurus pada garis netral teoritis AB, tetapi bergeser sebesar sudut  $\alpha$  sehingga tegak lurus pada garis netral teoritis A' B'.

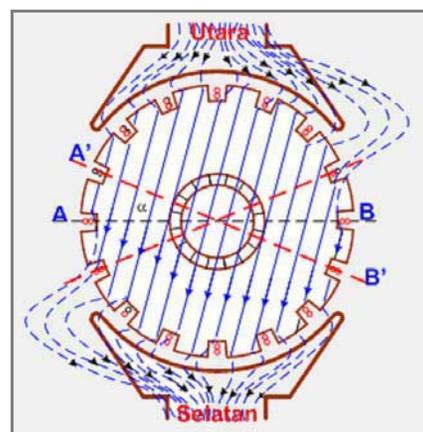
Sikat yang diletakkan pada permukaan komutator yang terletak pada garis netral AB harus digeser letaknya supaya tidak timbul bunga api. Sikat harus digeser sesuai dengan pergeseran garis netral.



Gambar 5.71 Fluks Medan Utama



Gambar 5.72 Fluks Medan Jangkar



Gambar 5.73 Reaksi Jangkar

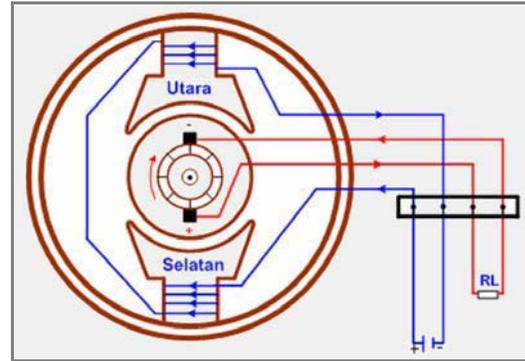
Bila sikat tidak digeser maka komutasi akan jelek, sebab sikat terhubung dengan penghantar yang mengandung tegangan.

### 5.4.4 Hubungan Generator Arus Searah

Berdasarkan sumber arus kemagnitan untuk lilitan kutub magnet, maka dapat dibedakan atas :

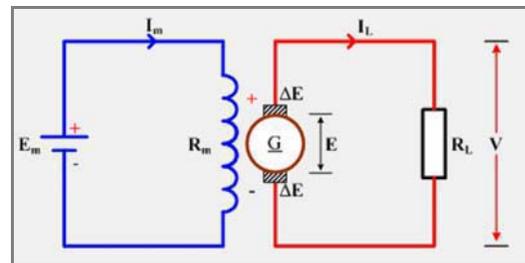
- **Generator dengan Penguat Terpisah**, jika arus untuk lilitan kutub magnet berasal dari sumber arus searah yang terletak di luar generator.
- **Generator dengan Penguat Sendiri**, jika arus untuk lilitan kutub magnet berasal dari generator itu sendiri.

- $I_a$  = Arus jangkar
- $I_L$  = Arus beban
- $P_j$  = Daya jangkar
- $V$  = Tegangan terminal jangkar
- $\Delta e$  = Kerugian tegangan pada sikat
- $R_a$  = Tahanan lilitan jangkar
- $R_L$  = Tahanan beban
- $P_L$  = Daya keluar (beban)



#### 5.4.4.1 Generator Penguat Terpisah

Dengan terpisahnya sumber arus searah untuk lilitan medan dan generator, berarti besar kecilnya arus medan tidak terpengaruh oleh nilai-nilai arus ataupun tegangan pada generator (Gambar 5.74).



Gambar 5.74 Generator Penguat Terpisah

$$\text{Persamaan arus: } I_m = \frac{E_m}{R_m}$$

$$I_a = I_L$$

**Persamaan Tegangan :**

$$E = V + I_a \cdot R_a + 2\Delta e$$

$$V = I_L \cdot R_L$$

$$P_j = I_a \cdot V \text{ Watt}$$

$$P_L = V \cdot I_L \text{ Watt}$$

**Keterangan :**

$I_m$  = Arus penguat magnet

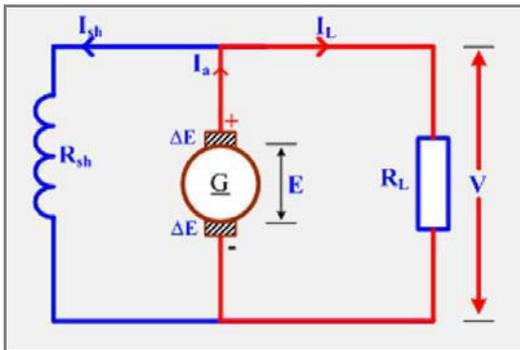
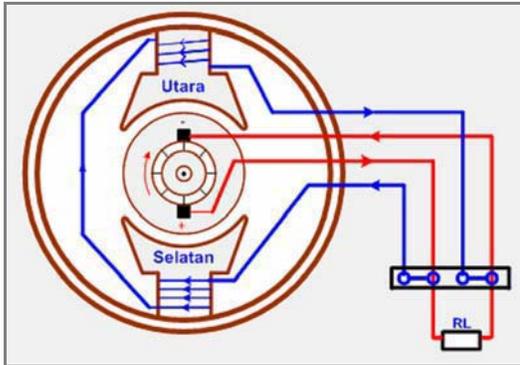
$E_m$  = Tegangan sumber penguat magnet

$R_m$  = Tahanan lilitan penguat magnet

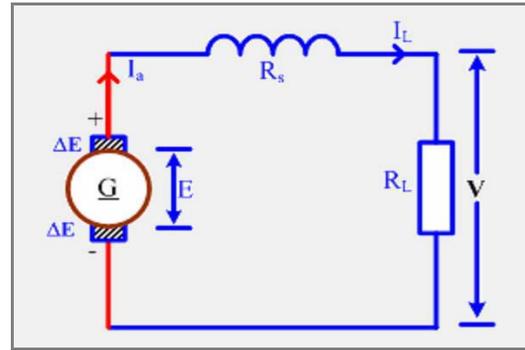
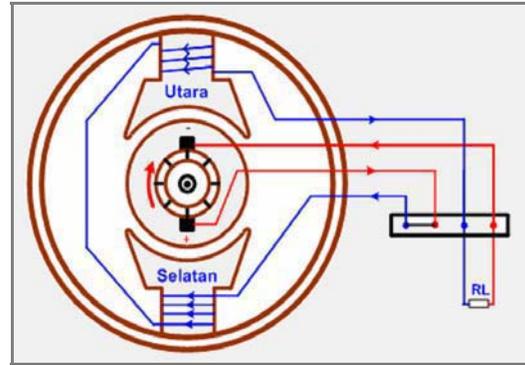
#### 5.4.4.2 Generator Penguat Sendiri

Karena generator jenis ini memperoleh arus untuk lilitan medan dari dalam generator itu sendiri, maka dengan sendirinya besarnya arus medan akan terpengaruh oleh nilai-nilai tegangan dan arus yang terdapat pada generator. Hal ini akan tergantung pada cara hubungan lilitan penguat magnet dengan lilitan jangkar.

### a. Generator Shunt



Gambar 5.75 Generator Shunt



Gambar 5.76 Generator Seri

#### Persamaan arus :

$$I_a = I_L + I_{sh}$$

$$I_{sh} = \frac{V}{R_{sh}}$$

#### Persamaan Tegangan :

$$E = V + I_a \cdot R_a + 2\Delta e$$

$$V = I_L \cdot R_L$$

### b. Generator Seri

#### Persamaan arus :

$$I_a = I_s = I_L$$

#### Persamaan Tegangan :

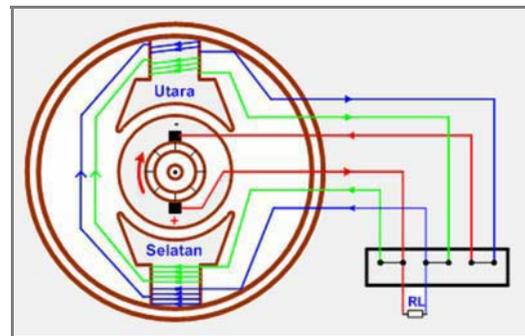
$$E = V + I_a \cdot R_a + I_s \cdot R_s + 2\Delta e$$

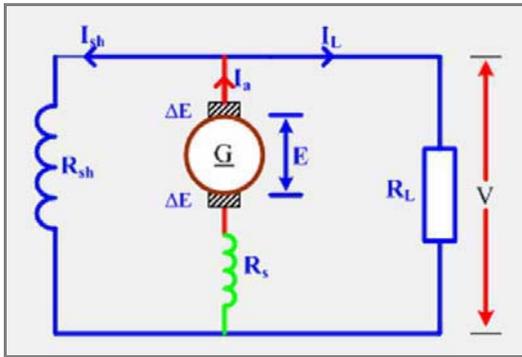
$$= V + I_a (R_a + R_s) + 2\Delta e$$

### c. Generator Kompon

Pada generator kompon lilitan medan penguat yang terdapat pada inti kutub magnet terdapat 2 (dua), yaitu untuk seri dan shunt. Berdasarkan cara meletakkan lilitan tersebut maka dapat dibentuk hubungan. *Generator kompon panjang* dan *generator kompon pendek*

#### c.1 Generator Kompon Panjang





Gambar 5.77 Generator Kompon Panjang

Persamaan arus :

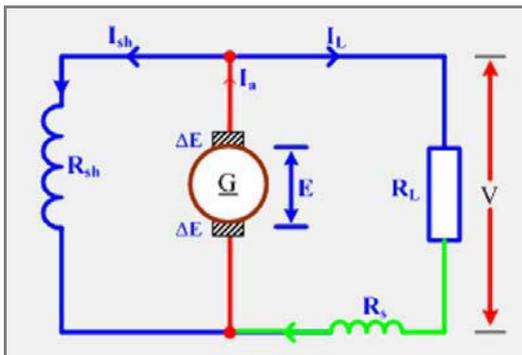
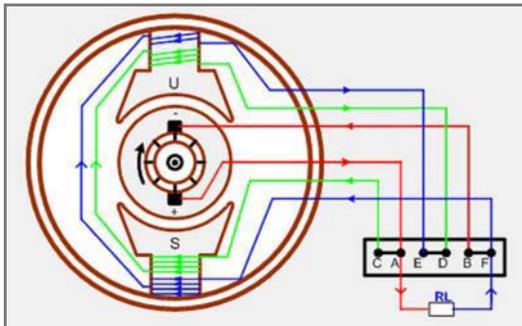
$$I_s = I_a$$

$$I_a = I_L + I_{sh}$$

Persamaan Tegangan :

$$E = V + I_a (R_a + R_s) + 2\Delta c$$

### c.2 Generator Kompon Pendek



Gambar 5.78 Generator Kompon Pendek

Persamaan arus :

$$I_s = I_L$$

$$I_a = I_L + I_{sh}$$

$$I_{sh} = \frac{V}{R_{sh}}$$

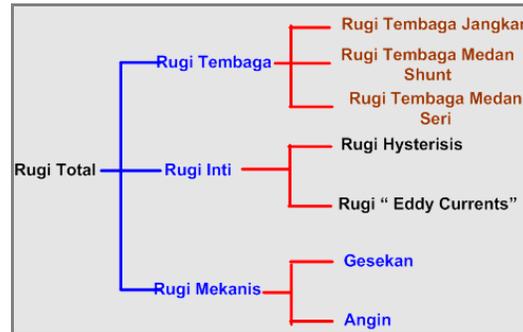
Persamaan Tegangan :

$$E = V + I_a R_a + I_s R_s + 2\Delta e$$

$$= I_a R_a + I_{sh} R_{sh} + 2\Delta e$$

## 5.4.5 Efisiensi

Rugi – rugi yang terjadi dalam sebuah generator arus searah dapat dibagi sebagai berikut :



### • Rugi Tembaga

- Rugi Tembaga jangkar =  $I_a^2 R_a$  Watt
- Rugi Tembaga Medan Shunt =  $I_{sh}^2 R_{sh}$  Watt
- Rugi Tembaga Medan Seri =  $I_s^2 R_s$  Watt

### • Rugi Inti

- Rugi Hysteresis ,  $P_h \propto B_{max}^{1.6} \cdot f$
- Eddy Currents ,  $P_e \propto B_{max}^2 \cdot f^2$

### • Rugi Mekanis

- Rugi gesekan pada poros
- Rugi angin akibat putaran jangkar.
- Rugi gesekan akibat gesekan sikat dengan komutator.



Gambar 5.79 Diagram Aliran Daya pada Generator Arus Searah

Diagram aliran daya dari sebuah generator dc bias diilustrasikan seperti diperlihatkan pada gambar 5.79.

**Rugi Besi dan Gesekan =**  
 Daya Masuk Mekanis ( $P_m$ ) - Daya Jangkar ( $P_j$ )

**Rugi Tembaga Total =**  
 Daya Jangkar ( $P_j$ ) - Daya Keluar Generator ( $P_{out}$ )

**Efisiensi Mekanis  $\eta_m$**   

$$= \frac{\text{Daya yang dibangkitkan jangkar}}{\text{Daya Masuk Mekanis}} \times 100\%$$

**Efisiensi Listrik  $\eta_l$**   

$$= \frac{\text{Daya Keluar Generator}}{\text{Daya dibangkitkan jangkar}} \times 100\%$$

**Efisiensi Total  $\eta_t$**   

$$= \frac{\text{Daya Keluar Generator}}{\text{Daya Masuk Mekanis}} \times 100\%$$

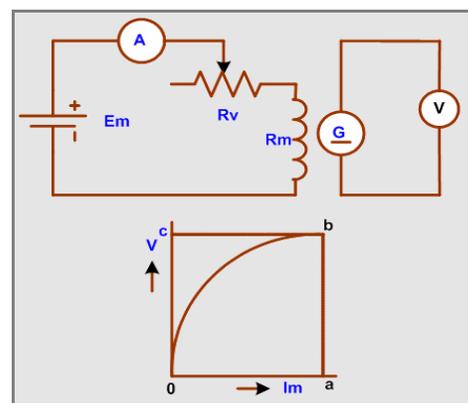
### 5.4.6 Karakteristik Generator

- **Karakteristik Beban Nol ( $E_o / I_m$ )**  
 Memperlihatkan hubungan antara pembangkitan Ggl tanpa beban (beban nol) dalam jangkar ( $E_o$ ) dan arus medan ( $I_m$ ) pada kecepatan konstan.

- **Karakteristik Dalam atau Total ( $E/I_a$ )**  
 Memperlihatkan hubungan antara Ggl  $E$  yang diinduksikan secara nyata dalam jangkar dan arus jangkar  $I_a$ .
- **Karakteristik Luar ( $V/I_a$ )**  
 Memperlihatkan hubungan antara tegangan terminal  $V$  dan arus beban  $I$ . Kurva ini dibawah karakteristik dalam, karena itu perhitungan bisa diambil dari kerugian tegangan diatas resistansi jangkar.

#### 5.4.6.1 Generator Penguat Terpisah

##### a. Karakteristik Beban Nol



Gambar 5.80 Rangkaian Generator Beban Nol

Rangkaian untuk memperoleh data yang diperlukan untuk membuat kurva beban nol diperlihatkan pada gambar 5.80.

Bila arus medan dinaikkan secara bertahap dengan menggunakan rheostat dan nilai perubahan arusnya dibaca dengan Amperemeter yang dihubungkan pada rangkaian medan.

Persamaan Tegangan untuk Generator

$$DC \text{ adalah : } E = \frac{\phi \cdot Z \cdot N}{60} \times \frac{P}{a} \text{ Volt, bila}$$

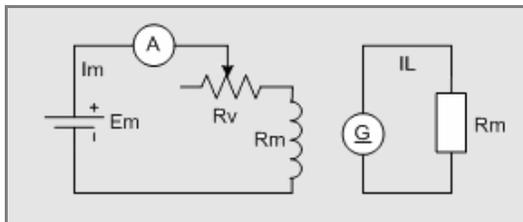
kecepatan dijaga konstan maka :

$$E = c \cdot \phi.$$

Penambahan arus medan akan mengakibatkan kenaikan tegangan yang didistribusikan sampai mencapai daerah saturasi.

### b. Karakteristik Berbeban

Gambar 5.81 memperlihatkan Generator DC saat berbeban.

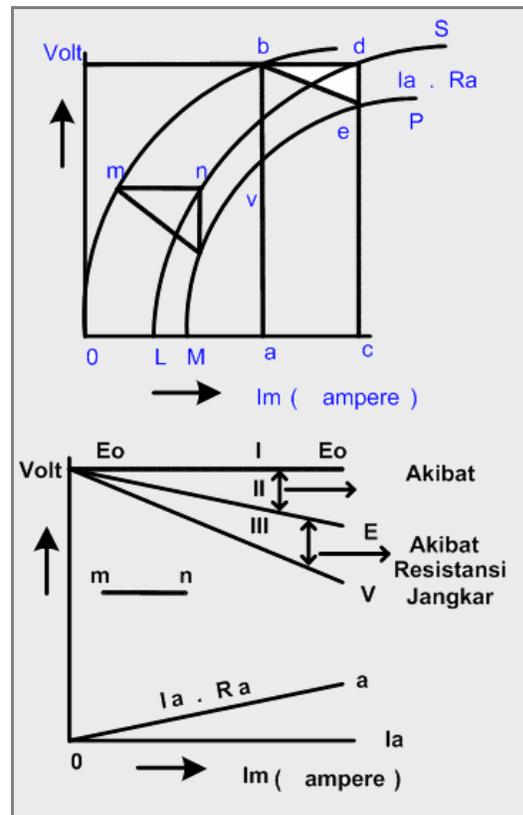


Gambar 5.81 Rangkaian Generator Berbeban

Kurva generator DC penguat terpisah saat dibebani (Gambar 5.82) dapat diambil dari kurva beban nol dengan cara mengurangnya dengan kerugian akibat reaksi jangkar dan resistansi jangkar.

### c. Karakteristik Dalam dan Luar

Perhatikan kembali gambar 5.82, pada waktu generator dibebani maka timbul penurunan tegangan akibat reaksi



Gambar 5.82 Kurva Generator Arus Searah saat Dibebani

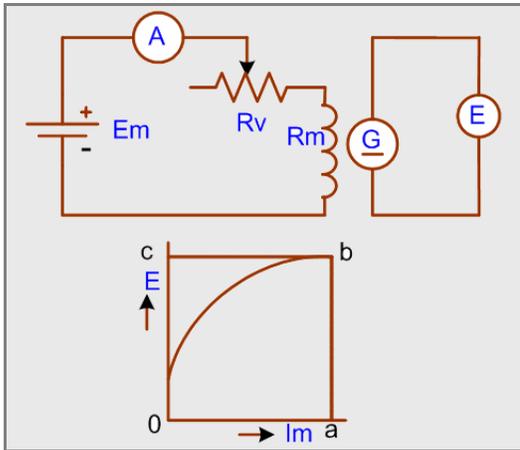
jangkar dan resistansi jangkar.

Apabila penurunan tegangan akibat reaksi jangkar dikurangkan dengan  $E_o$ , maka akan diperoleh  $E$  (kurva II) yang menunjukkan tegangan yang sebenarnya yang terjadi pada jangkar saat generator dibebani.

Selanjutnya bila kerugian tegangan akibat resistansi jangkar  $I_a R_a$  dikurangkan terhadap  $E$  maka akan diperoleh tegangan terminal  $V$  (kurva III). Kurva II memperlihatkan Karakteristik Dalam dan Kurva III Karakteristik Luar.

### 5.4.6.1 Kurva Beban Nol Generator Penguat Sendiri

Kurva beban nol dari generator penguat sendiri (Generator Shunt dan Seri) bisa didapat dengan cara melepaskan kumparan medan dari generator dan dihubungkan dengan sumber tegangan arus searah dari luar .



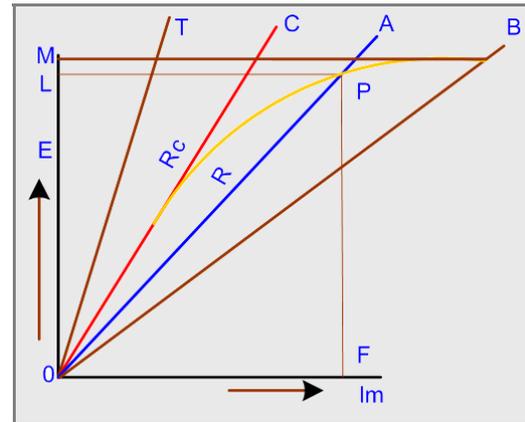
Gambar 5.83 Percobaan Beban Nol Generator Penguat Sendiri

Seperti halnya pengambilan data untuk generator dengan penguat terpisah, pada penguat sendiripun arus medan ini diatur secara bertahap dengan rheostat pada kecepatan konstan. Sebagai akibat adanya magnet sisa pada kutub magnet, walaupun  $I_m = 0$  sudah terjadi sedikit Ggl sehingga kurva akan dimulai diatas 0 (nol) .

#### a. Resistansi Kritis Generator Shunt

Untuk menentukan resistansi kritisnya, maka generator dihubungkan sebagai generator shunt. Perhatikan gambar 5.84, Titik P terletak pada garis resistansi medan penguat OA. Garis OA digambarkan dengan kemiringan yang sama dengan resistansi kumparan

$$\text{penguat OA (R)} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ampere}}$$



Gambar 5.84 Resistansi Kritis Generator Shunt

Tegangan OL merupakan tegangan maksimum pada saat generator mempunyai nilai resistansi medan R. Bila resistansi medan penguat diturunkan menjadi OB maka tegangan yang dibangkitkan menjadi OL. Sebaliknya bila resistansi dinaikkan terus sehingga tidak memotong kurva beban nol (OT) maka tegangan tidak akan dibangkitkan.

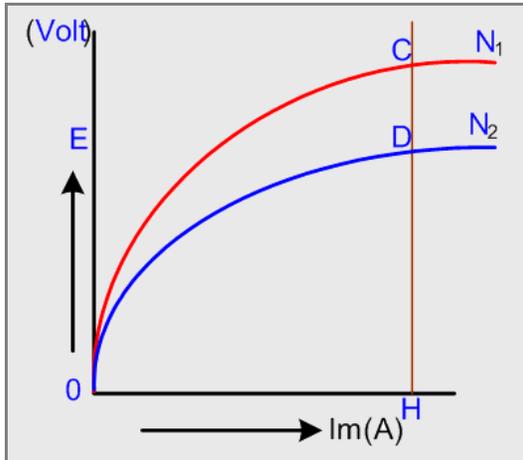
Nilai resistansi yang terletak sepanjang garis kemiringan dimana tegangan masih bisa dibangkitkan disebut **resistansi kritis** ( $R_c$ ). Resistansi kritis ini merupakan tangen dari kurva.

#### b. Karakteristik Beban Nol pada Kecepatan yang Berbeda

Kurva beban nol dengan kecepatan yang berbeda, digambarkan dengan kurva N1 dan N2 (Gambar 5.85). Karena perubahan tegangan E sebanding dengan perubahan N pada nilai  $I_m$  yang sama, maka :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} \text{ atau } E_2 = E_1 \frac{N_2}{N_1}$$

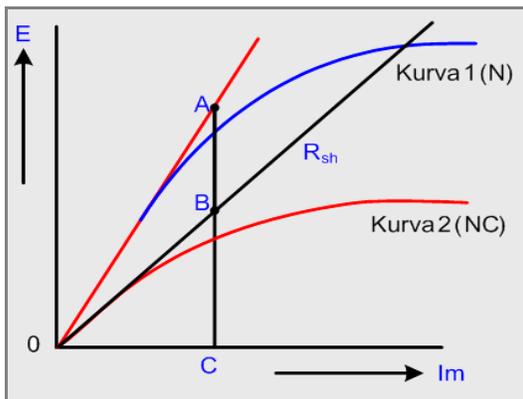
$E_1 = HC$  bila  $N_1$   
 untuk  $I_m = OH$ ,  $E_1 = HC$  bila  $N_1$   
 $I_m = OH$ ,  $E_2 = HD$  Bila  $N_2$   
 $\therefore E_2 = HC \times \frac{N_2}{N_1}$



Gambar 5.85 Karakteristik Beban Nol pada Kecepatan Berbeda

### c. Kecepatan Kritis

Kecepatan kritis dari sebuah generator shunt adalah kecepatan dimana resistansi kumparan medan magnet yang ada menunjukkan resistansi kritis. Pada gambar 5.86 kurva 2 memperlihatkan kecepatan kritis sebab garis  $R_{sh}$  merupakan resistansi kritis.



Gambar 5.86 Kurva Kecepatan Kritis

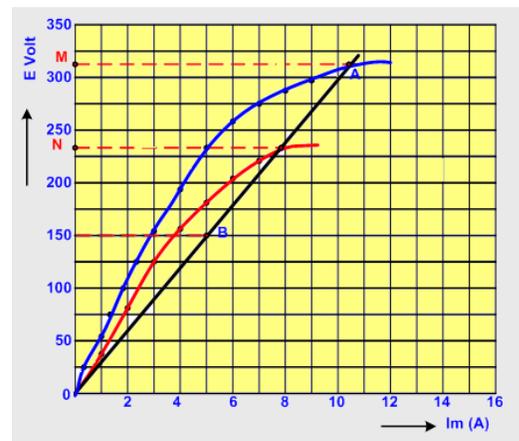
**Contoh :** Karakteristik beban nol dari sebuah generator arus searah shunt yang berputar pada kecepatan 1000 Rpm adalah sebagai berikut :

$E_0(V)$	52,5	107,5	155	196,5	231	256,5
$I_m(A)$	1	2	3	4	5	6

$E_0(V)$	275	287,5	298	308	312
$I_m(A)$	7	8	9	10	11

Perkiraan tegangan beban nol ( $E_0$ ) yang akan terjadi bila putaran 800 Rpm dan resistansi medan 30 Ohm .

Jawab :



Gambar 5.87 Contoh Karakteristik Beban Nol

- Misal:
- $I_m = 5A$ , lalu kalikan dengan 30 Ohm ( $5 \times 30 = 150$  Volt)
  - Buat titik B (5 A, 150 Volt).
  - Buat garis dari titik 0 melalui B, dan memotong di A.
  - Buat garis horizontal dari titik A ke sumbu Y dan memotong di M.
  - OM menunjukkan tegangan maksimum yang dibangkitkan generator dengan resistansi medan 30 Ohm dan kecepatan 1000 Rpm,  $OM = 310$  Volt.

Untuk mendapatkan ggl induksi saat  $N = 800$  Rpm, harus dibuat kurva baru dengan menganggap ggl sebanding dengan perubahan kecepatan.

Semua nilai tegangan pada 1000 Rpm dikalikan dengan  $\frac{800}{1000} = 0,8$  dan kurva untuk  $N = 800$  Rpm dibuat:

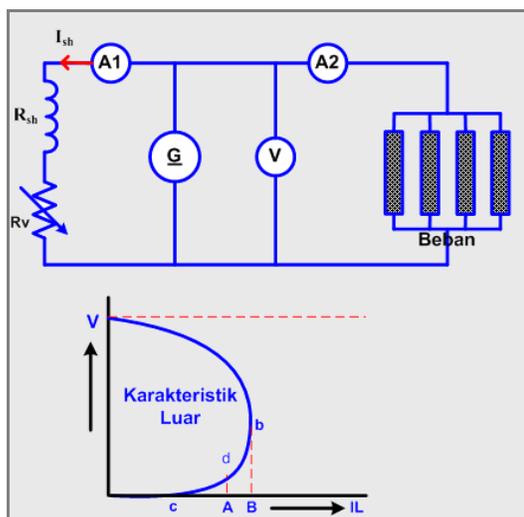
$E_0$ (volt)	42	86	124	157,2	184,8	212,4	220	230
$I_m$ (Amp)	1	2	3	4	5	6	7	8

- dengan  $R_{sh} = 30$  Ohm,  $ON = 230$  Volt

#### d. Karakteristik Luar

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, bahwa tegangan terminal generator akan turun apabila terjadi penambahan beban. Ada tiga penyebab pokok yang mengakibatkan turun tegangan terminal generator shunt saat berbeban

- (1) Kerugian tegangan pada resistansi jangkar ;
- (2) Kerugian tegangan akibat reaksi jangkar ;
- (3) Perurunan tegangan akibat resistansi jangkar dan reaksi jangkar, selanjutnya mengakibatkan turunnya suplai arus penguat ke medan magnet sehingga Ggl induksi menjadi kecil .



Gambar 5.88 Generator Arus Searah Shunt Berbeban

## 5.5 Motor Arus Searah

### 5.5.1 Prinsip Dasar

Sebuah motor listrik adalah suatu mesin yang mengubah energi masukan listrik menjadi energi keluaran mekanik, jadi pada dasarnya sebuah mesin arus searah bisa difungsikan sebagai motor atau ge-nerator.

Bila suatu penghantar yang dialiri arus ditempatkan dalam suatu medan magnet, maka akan timbul daya yang besarnya  $F = B \cdot I \cdot L$  (Nw). Arah gaya  $F$  dapat ditentukan berdasarkan hukum tangan kiri Flemming.

### 5.5.2 Persamaan Tegangan dan Daya

Gaya yang terjadi pada motor arus searah tergantung pada besarnya arus yang melewati jangkar dan fluks magnet dari medan magnet (penguat).

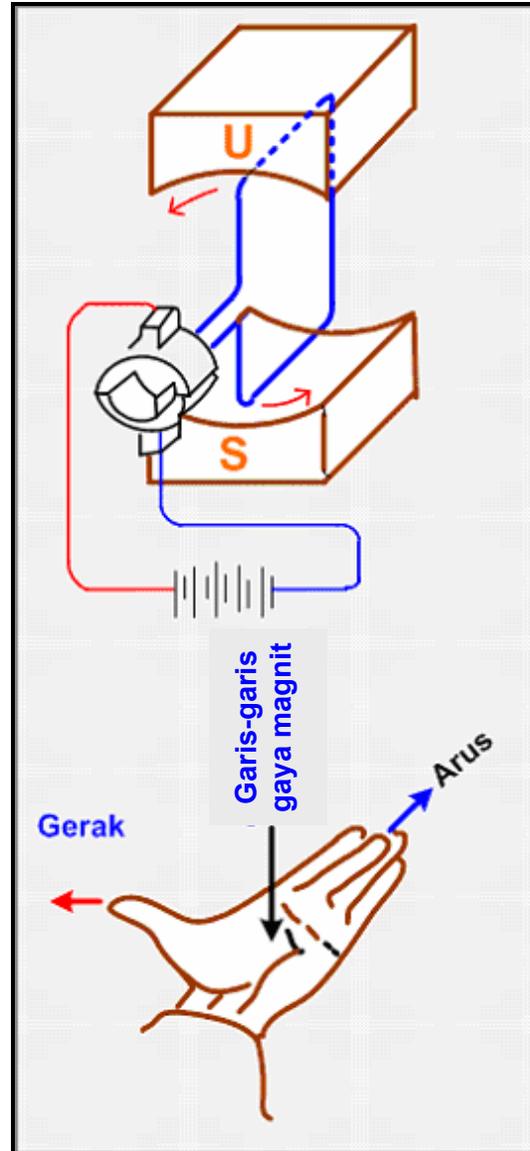
Bila belitan (jangkar) telah berputar, maka dalam belitan itu akan timbul suatu tegangan yang arahnya berlawanan dengan tegangan yang disuplai dari luar, dan ini disebut Ggl lawan.

Besarnya Ggl Lawan yang dibangkitkan :

$$E = \frac{\phi \cdot Z \cdot N}{60} \times \frac{P}{A} \text{ Volt} \dots\dots\dots(1)$$

$$V = E + I_a \cdot R_a \text{ Volt} \dots\dots\dots(2)$$

$$I_a = \frac{V - E}{R_a} \text{ Ampere} \dots\dots\dots(3)$$



Gambar 5.89 Prinsip Kerja Motor Arus Searah

Bila persamaan (2) dikalikan dengan  $I_a$ , maka :

$$V \cdot I_a = E \cdot I_a + I_a^2 R_a \dots\dots\dots (4)$$

$V \cdot I_a$  = Daya yang disuplai ke jangkar motor.

$I_a^2 R_a$  = Rugi Tembaga dlm jangkar

$E \cdot I_a$  = Daya yang digunakan jangkar motor yang mengakibatkan berputarnya jangkar.

$E \cdot I_a$  tidak semuanya ada pada poros, karena sebagian digunakan untuk mengatasi kerugian mekanis atau kerugian gesekan dari motor.

Daya Mekanis ( $P_m$ )

$$P_m = E \cdot I_a = V \cdot I_a - I_a^2 \cdot R_a$$

Differentialkan kedua sisi dengan  $I_a$ ,

$$\text{maka : } \frac{dP_m}{dI_a} = V - 2I_a \cdot R_a$$

Daya mekanik yang dibangkitkan akan maksimum bila  $\frac{dP_m}{dI_a}$  sama dengan nol.

$$V - 2 \cdot I_a \cdot R_a = 0$$

$$I_a \cdot R_a = \frac{V}{2}$$

$$E = V - I_a \cdot R_a = \frac{V}{2}$$

Jadi  $I_a$  harus cukup besar supaya  $E$  setengah dari  $V$ , tetapi ini sulit untuk dicapai karena  $I_a$  akan terlampau besar yang menyebabkan panas, efisiensi akan dibawah 50%.

### 5.5.3 Torsi

Torsi adalah putaran suatu gaya pada sebuah poros, dan diukur dengan hasil perkalian gaya dengan jari-jari lingkaran dimana gaya tersebut terjadi(bekerja).

$$\text{Torsi } T = F \cdot r \text{ (N-m)}$$

Gaya yang bekerja pada satu putaran penuh akan menimbulkan energi sebesar :  $F \cdot 2\pi \cdot n$  Joule.

Daya yang dibangkitkan :

$$P_m = T \cdot \omega \text{ Watt}$$

$$= F \cdot r \times 2\pi \cdot n \text{ joule/detik}$$

#### 5.5.3.1 Torsi Jangkar

$T_a$  adalah torsi yang dibangkitkan oleh jangkar motor yang berputar dengan kecepatan per detik ( $n$ ), maka daya yang dibangkitkan adalah :

$$= T_a \times 2 \cdot \pi \cdot n \text{ Watt .}$$

$$P_m = E \cdot I_a \text{ Watt}$$

$$T_a \times 2\pi \cdot n = E \cdot I_a \text{ Watt}$$

$$T_a \times 2\pi \cdot n = \frac{\phi \cdot Z \cdot N}{60} \times \frac{P}{A} \times I_a$$

$$T_a = \frac{1}{2\pi} \phi \cdot Z \cdot P \times \frac{I_a}{A} \text{ Nm}$$

lalu dengan nol\_

$$= 0,159 \phi \cdot Z \times \frac{I_a}{A} \text{ Nm}$$

#### 5.5.3.2 Torsi Poros

Tidak seluruh torsi yang dihasilkan pada jangkar bisa dimanfaatkan oleh beban yang dihubungkan pada poros, karena sebagian akan hilang karena rugi-rugi besi dan gesekan pada motor. Torsi yang bisa dimanfaatkan ini disebut Torsi Poros ( $T_{sh}$ )

$T_{sh}$  = Torsi Jangkar ( $T_a$ ) - Torsi yang hilang karena rugi besi dan gesekan ( $T_f$ )

$$T_{sh} = \frac{E_b \cdot I_a - \text{Rugi besi dan gesekan}}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

$$= \frac{HP \times 746}{2 \cdot \pi \cdot n} \text{ Nm}$$

## 5.5.4 Rugi-rugi Daya dan Efisiensi

Rugi-rugi daya yang terjadi pada sebuah motor arus searah dapat dibagi kedalam :

- Rugi- rugi tembaga atau listrik.
- Rugi-rugi besi atau magnet.
- Rugi-rugi mekanis.

### ❖ Rugi-rugi tembaga atau listrik

- Daya yang hilang dalam panas lilitan medan dan rangkaian jangkar
- Rugi tembaga dari lilitan dibagi atas:
  - ✓ Rugi tembaga jangkar  $\Rightarrow I_a^2 \cdot R_a$  Watt
  - ✓ Rugi tembaga medan terdiri dari:

$I_{sh}^2 \cdot R_{sh}$  Watt  $\Rightarrow$  Motor Shunt/  
Motor Kompon

$I_s^2 \cdot R_s$  Watt  $\Rightarrow$  Motor Seri/  
Motor Kompon

### ❖ Rugi-rugi Besi atau Magnet

#### - Rugi histerisis

$$P_h = \eta \cdot B_{\max} \cdot f \cdot V \text{ Watt}$$

$\eta$  = Steinmetz hysteresis coefficient

$B_{\max}$  = Kerapatan fluks

$$\text{maksimum} \left[ \frac{Wb}{m^2} \right]$$

$f$  = Frekuensi dlm Hertz

$V$  = Volume inti ( $m^3$ )

nilai  $x$  = antara 1,6 s/d 2

#### - Arus Pusar (Eddy Current)

$$P_e = K_e \cdot B_{\max}^2 \cdot f^2 \cdot V \cdot t^2 \text{ Watt}$$

$K_e$  = Konstanta arus pusar

$t$  = Ketebalan dari inti magnet (m)

### ❖ Rugi Mekanis

Rugi mekanis yang terjadi pada motor disebabkan oleh adanya ge-

sekan dan angin, seperti pada bagian poros motor.

### ❖ Efisiensi

Efisiensi adalah prosentase perbandingan daya keluar dan daya masuk yang terjadi pada motor.

$$\eta = \frac{\text{Daya Keluar}}{\text{Daya Masuk}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{\text{Daya Keluar}}{\text{Daya Masuk} + \Sigma \text{rugi}} \times 100\%$$

## 5.5.5 Macam-macam Hubungan Motor Arus Searah

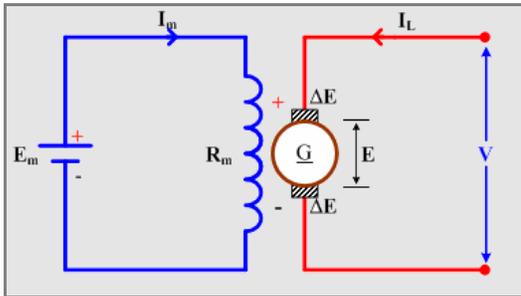
Seperti pada generator arus searah berdasarkan sumber arus kemagnetan untuk kutub magnet, maka dapat dibedakan atas :

- **Motor arus searah dengan penguat terpisah**, bila arus untuk lilitan kutub magnet berasal dari sumber arus searah yang terletak di luar motor.
- **Motor arus searah dengan penguat sendiri**, bila arus untuk lilitan kutub magnet berasal dari motor itu sendiri.

Sedangkan berdasarkan hubungan lilitan penguat magnet terhadap lilitan jangkar untuk motor dengan penguat sendiri dapat dikelompokkan atas :

- Motor Shunt
- Motor Seri
- Motor Kompon  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Panjang} \\ \text{Pendek} \end{array} \right.$

### 5.5.5.1 Motor Arus Searah Penguat Terpisah



Gambar 5.90 Rangkaian Motor Arus Searah Penguat Terpisah

Persamaan Arus, Tegangan dan Daya

$$I_m = \frac{E_m}{R_m} \text{ Amp}$$

$$I_a = I_L$$

$$E = V - I_a \cdot R_a - 2\Delta e \text{ Volt}$$

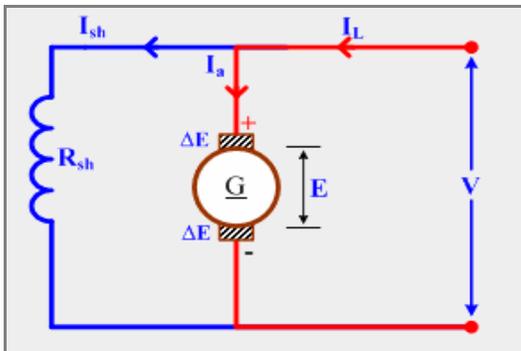
$$P_{in} = V \cdot I_L \text{ Watt}$$

$$P_j = P_m = E \cdot I_a \text{ Watt}$$

$$P_{out} = P_m - \text{Rugi besi \& gesekan}$$

### 5.5.5.2 Motor Arus Searah Penguat Sendiri

#### a. Motor Shunt



Gambar 5.91 Rangkaian Motor Arus Searah Penguat Sendiri Shunt

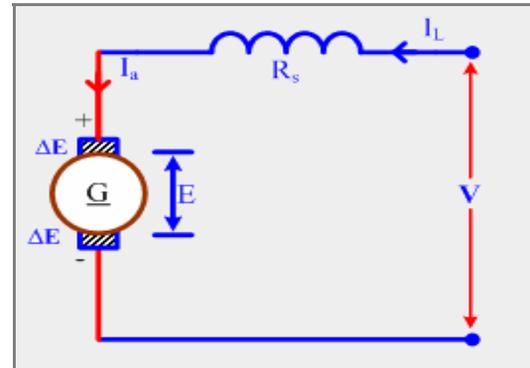
Persamaan Arus dan Tegangan :

$$I_L = I_a + I_{sh}$$

$$I_{sh} = \frac{V}{R_{sh}}$$

$$E = V - I_a \cdot R_a$$

#### b. Motor Seri



Gambar 5.92 Rangkaian Motor Arus Searah Penguat Sendiri Seri

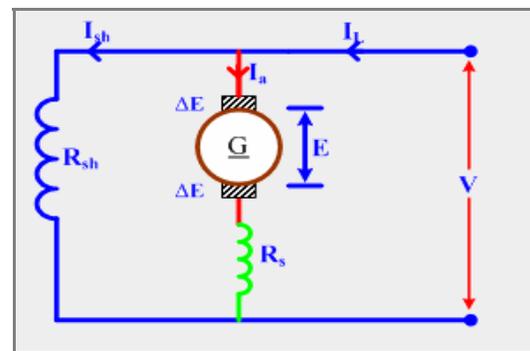
Persamaan Arus dan Tegangan

$$I_L = I_s = I_a$$

$$E = V - I_L (R_s + R_a)$$

#### c. Motor Kompon

##### c.1 Motor Kompon Panjang



Gambar 5.93 Rangkaian Motor Arus Searah Kompon Panjang

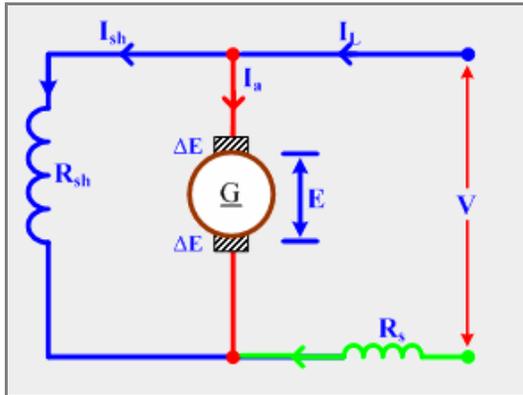
Persamaan Arus dan Tegangan

$$I_L = I_a + I_{sh}$$

$$I_{sh} = \frac{V}{R_{sh}}$$

$$V = E + I_a (R_a + R_s)$$

### c.1 Motor Kompon Pendek



Gambar 5.93 Rangkaian Motor Arus Searah Kompon Pendek

Persamaan Arus dan Tegangan

$$I_L = I_a + I_{sh}$$

$$I_{sh} = \frac{V_{ab}}{R_{sh}}$$

$$V = V_{ab} + I_L \cdot R_s$$

## 5.5.6 Karakteristik Motor Arus Searah

Karakteristik sebuah motor arus searah dapat kita tentukan berdasarkan persamaan kecepatan dan torsi.

- Persamaan Kecepatan

$$N = \frac{V - I_a \cdot R_a}{C\phi} \text{ Rpm}$$

- Persamaan Torsi

$$T = C \cdot I_a \cdot \phi \text{ Nm}$$

Berdasarkan persamaan diatas maka dapat diperoleh karakteristik-karakteristik

yang penting pada motor arus searah. Karakteristik tersebut antara lain

- Karakteristik putaran sebagai fungsi dan arus jangkar (Karakteristik Putaran)

$$N = f(I_a) \quad , \quad V \text{ konstan}$$

- Karakteristik torsi sebagai fungsi dari arus jangkar (Karakteristik Torsi)

$$T = f(I_a) \quad , \quad V \text{ konstan}$$

- Karakteristik putaran sebagai fungsi dari torsi (Karakteristik Mekanis)

$$N = f(T) \quad , \quad V \text{ konstan}$$

### 5.5.6.1 Karakteristik Motor Arus Searah Penguat Terpisah

#### a. Karakteristik Putaran

Putaran pada motor dengan penguat terpisah relatif konstan, penurunan kecepatan akibat perubahan beban sangat kecil. Hal ini disebabkan karena fluks medan pada motor relatif konstan dan tahanan jangkar  $R_a$  sangat kecil, sehingga penurunan kecepatan antara tanpa beban dan beban penuh adalah kecil sehingga motor bisa dikategorikan sebagai motor yang mempunyai kecepatan tetap.

#### b. Karakteristik Torsi

Berdasarkan persamaan  $T = C \cdot I_a \cdot \phi$  Nm, jika tegangan terminal  $V$  konstan maka arus ke lilitan medan penguat juga akan konstan, sehingga fluks yang ditimbulkan medan akan konstan.

Dengan demikian torsi pada motor dengan penguat terpisah hanya tergantung pada arus jangkar atau perubahan torsi berbanding lurus dengan arus jangkar.

#### c. Karakteristik Mekanis

Dengan merujuk pada persamaan

$T=C.I_a.\phi$  salah satu faktor yang mengakibatkan kenaikan Torsi adalah naiknya arus jangkar  $I_a$ , dan akibat naiknya arus jangkar maka berdasarkan persamaan  $N = \frac{V - I_a \cdot R_a}{C\phi}$  Rpm, kecepatan

akan turun dengan asumsi  $\phi$  konstan. Khusus untuk motor dengan penguat terpisah yang memiliki  $R_a$  kecil penurunan kecepatan tidak terlalu besar.

### 5.5.6.2 Karakteristik Motor Arus Searah Penguat Sendiri

Karakteristik Putaran, Torsi, dan Mekanis untuk motor shunt dengan penguat sendiri hampir sama dengan motor dengan penguat terpisah, sedangkan untuk motor seri dan kompon bisa dijelaskan sbb :

#### a. Karakteristik Putaran

##### Motor Seri :

Dengan memperhatikan kembali rangkaian listrik motor seri, besarnya arus jangkar ( $I_a$ ) sama dengan arus penguatan ( $I_s$ ) dengan demikian :

$\phi = f(I_a) = f(I_s)$ , dan berdasarkan persamaan :

$$N = \frac{V - I_a \cdot R_a}{C\phi} \text{ Rpm}$$

maka 
$$N = \frac{V - I_a \cdot R_a}{C.I_a} \text{ Rpm}$$

sehingga karakteristik akan berbentuk hiperbolis.

##### Motor Kompon

Karakteristik motor kompon berada diantara karakteristik motor seri dan motor shunt, sedangkan berdasarkan arah melilit penguat medannya motor kompon bisa dibagi atas Kompon Lawan dan Kompon Bantu.

#### b. Karakteristik Torsi

##### Motor Seri :

Berdasarkan persamaan :

$$T_a = 0,159 \phi \cdot Z \cdot P \times \frac{I_a}{A} \text{ Nm, atau}$$

$T_a \propto \phi \propto I_a$ , sebelum titik jenuh  $\phi \propto I_f$  dan  $I_a$ , karena  $I_a = I_f$  oleh karena itu pada beban ringan  $T_a \propto I_a^2$ . Sesudah titik jenuh  $\phi$  hampir berdiri sendiri maka  $T_a \propto I_a$ , bentuk karakteristik menjadi lurus.

##### Motor Kompon :

Akibat adanya fluks medan seri dan shunt pada motor kompon yang saling mempengaruhi, maka karakteristik Torsi yang terjadi merupakan gabungan dari karakteristik motor seri dan shunt. Pada saat beban normal dengan naiknya  $I_a$ , maka penambahan Torsi motor shunt lebih besar bila dibandingkan motor seri dan karakteristik motor kompon berada diantara kedua karakteristik tersebut, demikian juga pada saat beban besar.

#### c. Karakteristik Mekanis

##### Motor Seri

Dengan naiknya Torsi, akan mengakibatkan naiknya  $I_a$  dan  $I_f$  ( $\phi$ ), dari persamaan :  $N = \frac{V - I_a \cdot R_a}{C\phi}$  Rpm, pada

saat  $I_a = 0$ , maka harga  $N$  mendekati tak terhingga, sedangkan pada saat  $I_a$  ( $T_a$ ) besar, kecepatan turun mendekati nol.

##### Motor Kompon

Untuk motor kompon karakteristiknya berada diantara karakteristik motor seri dan motor shunt.

## 5.6 Motor Induksi Tiga

### 5.6.1 Konstruksi dan Prinsip Kerja

#### Pendahuluan

Mesin-mesin listrik digunakan untuk mengubah suatu bentuk energi ke energi yang lain, misalnya mesin yang mengubah energi mekanis ke energi listrik disebut generator, dan sebaliknya energi listrik menjadi energi mekanis disebut motor. Masing-masing mesin mempunyai bagian yang diam dan bagian yang bergerak.

Bagian yang bergerak dan diam terdiri dari inti besi, dipisahkan oleh celah udara dan membentuk rangkaian magnetik dimana fluksi dihasilkan oleh aliran arus melalui kumparan/belitan yang terletak didalam kedua bagian tersebut.

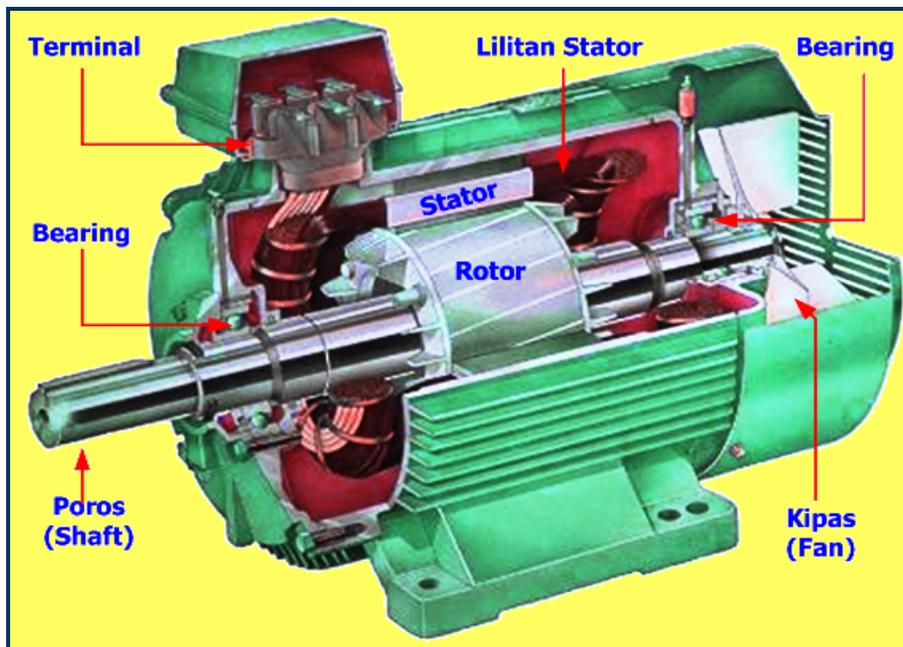
Pada umumnya mesin-mesin penggerak yang digunakan di Industri mempunyai daya keluaran lebih besar dari 1 HP dan menggunakan motor Induksi Tiga Fasa. Adapun kelebihan dan kekurangan motor induksi bila dibandingkan dengan jenis motor lainnya, adalah :

#### Kelebihan Motor Induksi

- Mempunyai konstruksi yang sederhana.
- Relatif lebih murah harganya bila dibandingkan dengan jenis motor yang lainnya.
- Menghasilkan putaran yang konstan.
- Mudah perawatannya.
- Untuk pengasutan tidak memerlukan motor lain sebagai penggerak mula.
- Tidak membutuhkan sikat-sikat, sehingga rugi gesekan bisa dikurangi.

#### Kekurangan Motor Induksi

- Putarannya sulit diatur.
- Arus asut yang cukup tinggi, berkisar antara 5 s/d 6 kali arus nominal motor



Gambar 5.95 Penampang Motor Induksi Tiga Fasa

Inti besi stator dan rotor terbuat dari lapisan baja silikon yang tebalnya berkisar antara 0,35 mm - 1 mm yang tersusun secara rapi dan masing-masing terisolasi secara listrik dan diikat pada ujung-ujungnya.

Celah udara antara stator dan rotor pada motor yg berukuran kecil 0,25 mm-0,75 mm, sedangkan pada motor yang berukuran besar bisa mencapai 10 mm. Celah udara yang besar ini disediakan untuk mengantisipasi terjadinya pelengkungan pada sumbu sebagai akibat pembebanan. Tarikan pada pita (belt) atau beban yang tergantung akan menyebabkan sumbu motor melengkung.

### 5.6.1.1 Stator



Gambar 5.96 Lilitan Motor Induksi

Pada dasarnya belitan stator motor induksi tiga fasa sama dengan belitan motor sinkron. Konstruksi statornya belapis-lapis dan mempunyai alur untuk melilitkan kumparan. Stator mempunyai tiga buah kumparan, ujung-ujung belitan kumparan dihubungkan melalui terminal untuk memudahkan penyambungan dengan sumber tegangan. Masing-masing kumparan stator mempunyai beberapa buah kutub, jumlah kutub ini menen-

tukan kecepatan motor tersebut. Semakin banyak jumlah kutubnya maka putaran yang terjadi semakin rendah.

### 5.6.1.2 Rotor

Motor Induksi bila ditinjau dari rotornya terdiri atas dua tipe yaitu rotor sangkar dan rotor lilit.

#### ❖ Rotor Sangkar

Motor induksi jenis rotor sangkar lebih banyak digunakan daripada jenis rotor lilit, sebab rotor sangkar mempunyai bentuk yang sederhana. Belitan rotor terdiri atas batang-batang penghantar yang ditempatkan di dalam alur rotor. Batang penghantar ini terbuat dari tembaga, alloy atau alumunium. Ujung-ujung batang penghantar dihubungkan singkat oleh cincin penghubung singkat, sehingga berbentuk sangkar burung. Motor induksi yang menggunakan rotor ini disebut *Motor Induksi Rotor Sangkar*.

Karena batang penghantar rotor yang telah dihubungkan singkat, maka tidak dibutuhkan tahanan luar yang dihubungkan seri dengan rangkaian rotor pada saat awal berputar. Alur-alur rotor biasanya tidak dihubungkan sejajar dengan sumbu (poros) tetapi sedikit miring.

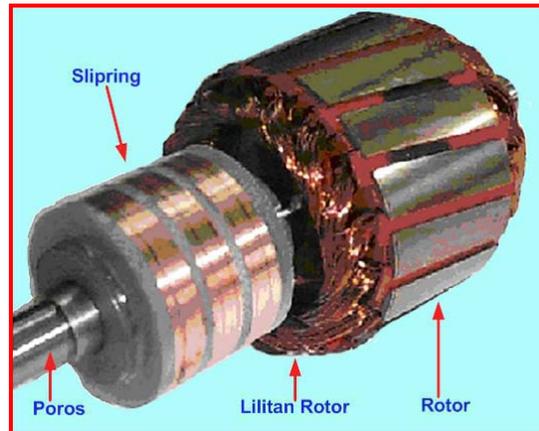


Gambar 5.97 Rotor Sangkar

## ❖ Rotor Lilit

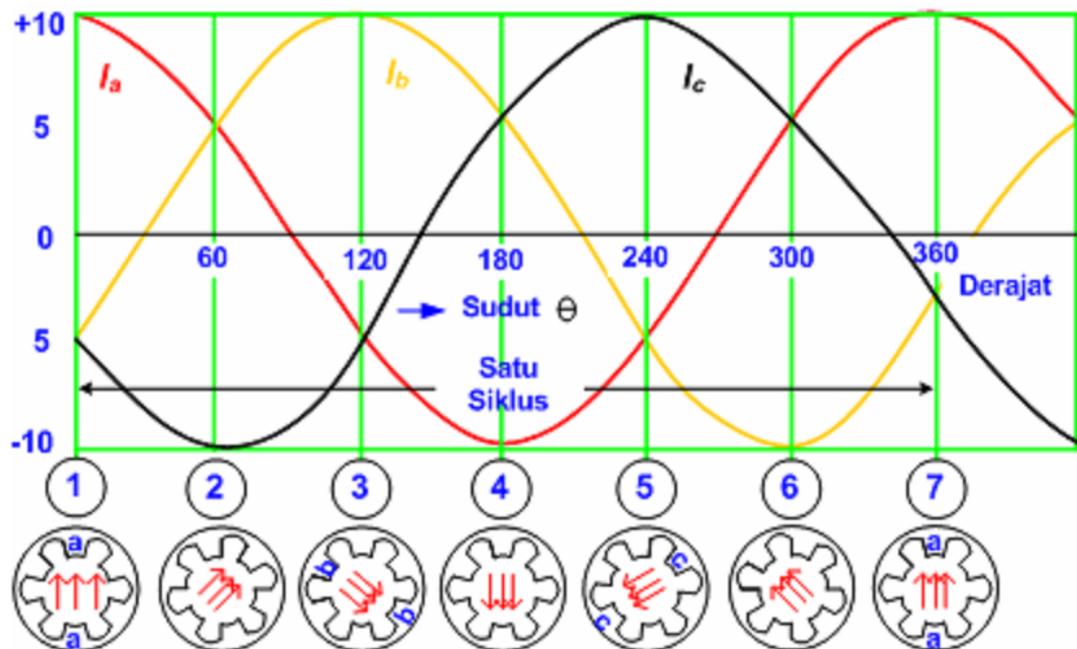
Rotor lilit terdiri atas belitan fasa banyak, belitan ini dimasukkan ke dalam alur-alur inti rotor. Belitan ini sama dengan belitan stator, tetapi belitan selalu dihubungkan secara bintang. Tiga buah ujung-ujung belitan dihubungkan ke terminal-terminal sikat/cincin seret yang terletak pada poros rotor.

Pada jenis rotor lilit kita dapat mengatur kecepatan motor dengan cara mengatur tahanan belitan rotor tersebut. Pada keadaan kerja normal sikat karbon yang berhubungan dengan cincin seret tadi dihubungkan singkat. Motor induksi rotor lilit dikenal dengan sebutan Motor Induksi Slipring atau Motor Induksi Rotor Lilit.



Gambar 5.98 Rotor lilit

### 5.6.1.3 Medan Putar

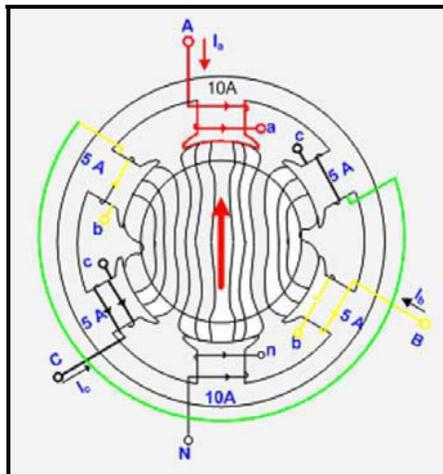


Gambar 5.99 Nilai Arus Sesaat dan Posisi Flux

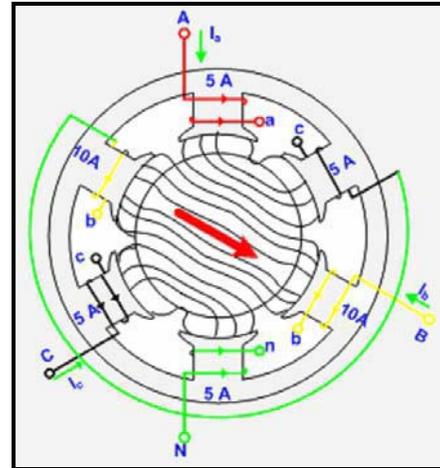
Putaran motor pada mesin arus bolak-balik ditimbulkan oleh adanya *medan putar* (fluksi yang berputar) yang dihasilkan dalam kumparan statornya. Medan putar ini timbul bila kumparan stator dihubungkan dengan sumber tegangan tiga fasa.

Hubungannya dapat berupa hubungan bintang atau segitiga. Pada gambar 5.98 diperlihatkan bagaimana terjadinya medan putar pada motor induksi tiga fasa. Perhatikan gambar 5.99 a s/d f

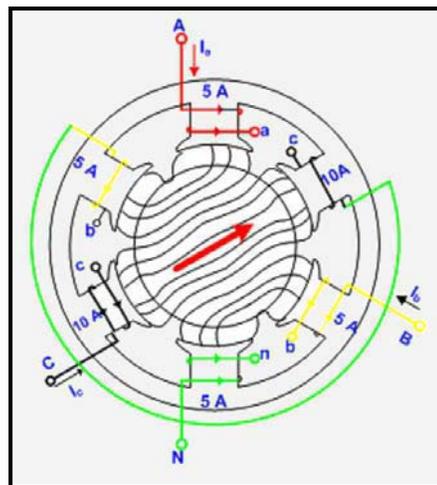
- Pada posisi pertama atau a, fluks resultan mempunyai arah yang sama dengan arah fluks yang dihasilkan oleh kumparan a - a.
- Pada posisi kedua atau b, fluks resultan mempunyai arah yang sama dengan arah fluks yang dihasilkan oleh kumparan c - c.
- Pada posisi ketiga atau c, fluks resultannya mempunyai arah yang sama dengan fluks yang dihasilkan oleh kumparan b - b.
- Pada posisi keempat s/d keenam terlihat fluks resultan yang terjadi arahnya akan berlawanan dengan arah fluks sebelumnya pada masing-masing kumparan.



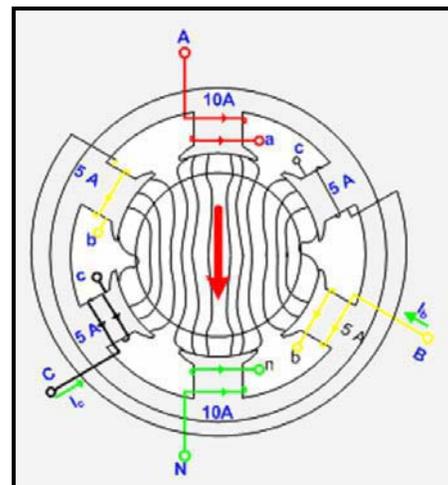
(a)



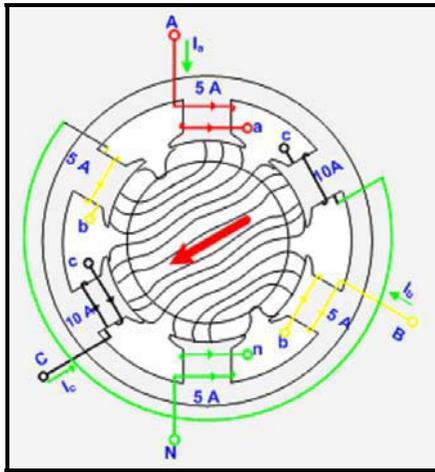
(b)



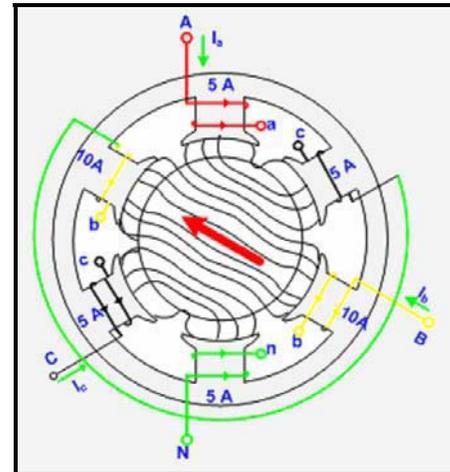
(c)



(d)



(e)



(f)

Gambar 5.100 Proses Terjadinya Medan Putar

Dari gambar diatas terlihat bahwa fluks resultan akan berputar, dan jumlah putarannya bisa ditentukan berdasarkan

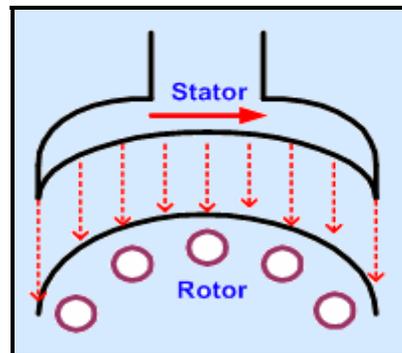
$$\text{persamaan : } N_s = \frac{120 \cdot f}{P} \text{ Rpm}$$

### 5.6.1.3 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa

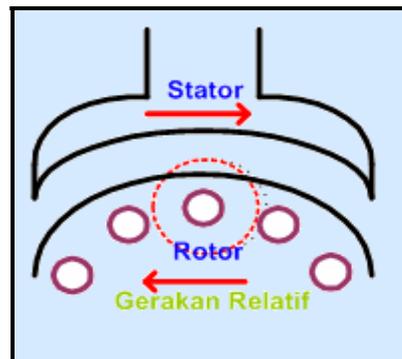
Prinsip kerja motor induksi atau terjadinya putaran pada motor, bisa dijelaskan sebagai berikut :

- Bila kumparan stator diberi suplai tegangan tiga fasa, maka akan terjadi medan putar dengan kecepatan  $N_s = \frac{120 \cdot f}{P}$
- Medan putar stator tersebut akan mengimbas penghantar yang ada pada rotor, sehingga pada rotor timbul tegangan induksi.
- Tegangan yang terjadi pada rotor menyebabkan timbulnya arus pada penghantar rotor.

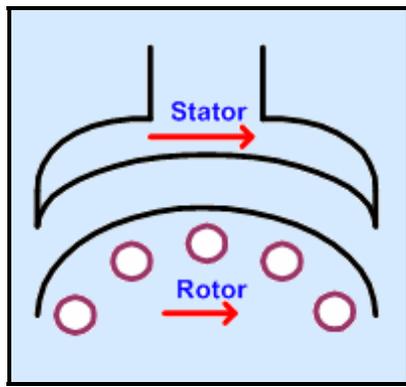
- Selanjutnya arus di dalam medan magnet menimbulkan gaya (F) pada rotor.



(a)



(b)



(c)

Gambar 5.101 Terjadinya Putaran pada Motor Induksi

- Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya ( $F$ ) pada rotor cukup besar untuk menanggung kopel beban, maka rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
- Supaya timbul tegangan induksi pada rotor, maka harus ada perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator ( $N_s$ ) dengan kecepatan putar rotor ( $N_r$ ). Perbedaan kecepatan antara  $N_r$  dengan  $N_s$  disebut Slip ( $S$ ), dan dinyatakan dengan persamaan  $S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\%$
- Bila  $N_r = N_s$  tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada kumparan jangkar rotor, sehingga tidak dihasilkan kopel. Kopel pada motor akan terjadi bila  $N_r$  lebih kecil dari  $N_s$ .

### 5.6.2 Frekuensi dan Slip Rotor

Kumparan stator motor induksi tiga fasa bila dihubungkan dengan suplai tegangan tiga fasa akan mengasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron sesuai dengan persamaan

$$N_s = \frac{120f}{P}$$

Medan putar yang terjadi pada stator ini akan memotong penghantar-penghantar yang ada pada bagian rotor, sehingga terinduksi arus, dan sesuai dengan dengan Hukum Lentz, sehingga rotor akan berputar mengikuti putaran medan stator.

Perbedaan kecepatan medan putar stator dengan putaran rotor biasa disebut slip. Apabila terjadi penambahan beban, maka akan mengakibatkan naiknya kopel motor dan selanjutnya akan memperbesar arus induksi pada bagian rotor.

Frekuensi rotor saat motor belum berputar nilainya akan sama dengan frekuensi yang terjadi pada belitan stator, dan apabila sudah berputar frekuensi rotornya akan sebanding dengan perubahan slip yang terjadi pada motor tersebut.

#### 5.6.2.1 Tegangan Induksi pada Rotor

Saat rotor belum berputar maka Slip = 1, frekuensi dari ggl rotor nilainya sama dengan frekuensi yang di suplai ke bagian stator. Nilai tegangan induksi pada rotor saat diam adalah maksimum, sehingga motor ekuivalen dengan sebuah transformator tiga fasa yang di hubung singkat pada sisi sekundernya.

Saat rotor mulai berputar, kecepatan relatif antara rotor dengan fluks medan putar stator akan menurun, sehingga tegangan induksi rotor berbanding langsung dengan kecepatan relatif, dengan demikian tegangan induksi di rotor akan mengalami penurunan.

Jadi untuk Slip S, tegangan induksi rotor akan S kali tegangan induksi saat diam, oleh karena itu pada kondisi ber-putar :

$$E_{2r} = SE_2$$

### 5.6.2.2 Slip dan Frekuensi Rotor

Seperti telah dijelaskan diatas, putaran rotor tidak akan sama dengan putaran medan stator, karena bila rotor berputar sama cepatnya dengan medan stator, tidak akan timbul perbedaan kecepatan sehingga tidak ada Ggl induksi yang timbul pada rotor, tidak ada arus dan tidak ada kopel yang mendorong rotor.

Itulah sebabnya rotor selalu berputar pada kecepatan dibawah kecepatan medan putar stator. Perbedaan kecepatan tergantung pada besarnya beban motor. Slip mutlak menunjukkan kecepatan relatif rotor terhadap medan putar.

$$\text{Slip Mutlak} = N_s - N_r$$

Slip (S) merupakan perbandingan slip mutlak terhadap  $N_s$ , ditunjukkan per unit atau persen oleh hubungan :

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\%$$

Dalam keadaan diam, frekuensi rotor ( $f_2$ ) sama besarnya dengan frekuensi sumber tegangan, bila rotor berputar frekuensi rotor tergantung pada besarnya kecepatan relatif atau slip mutlak. Hubungan antara frekuensi dengan slip dapat dilihat sebagai berikut :

$$N_s = \frac{120 \cdot f_1}{P} \text{ dan } f_1 = \frac{P \cdot N_s}{120}$$

dan pada rotor berlaku hubungan :

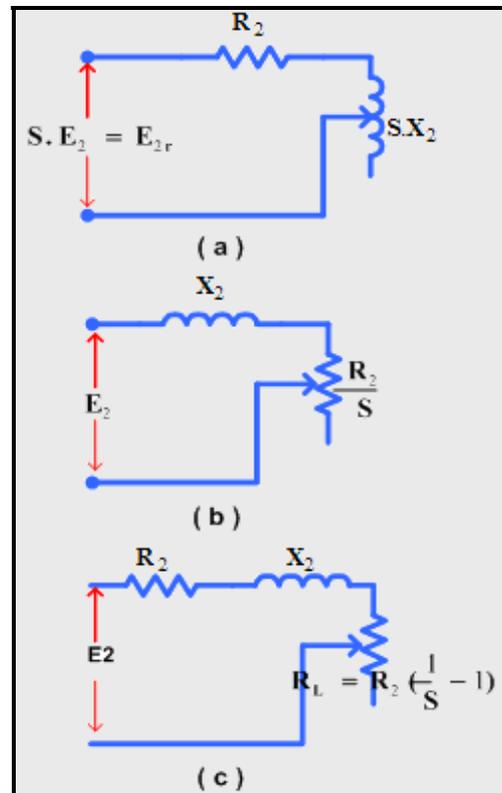
$$\frac{f_2}{f_1} = S \Rightarrow f_2 = S f_1$$

## 5.6.3 Rangkaian Ekuivalen

Dalam beberapa hal mesin Induksi menyerupai mesin sinkron, tetapi pada dasarnya mesin induksi ini hampir sama dengan transformator, terutama saat belum berputar.

Energi yang “dipindahkan” dari stator ke rotor dilakukan berdasarkan azas imbas elektromagnet(induksi) dengan bantuan fluksi bersama, karena itu rangkaian ekuivalen motor induksi digambarkan seperti rangkaian ekuivalen transformator. Bagian stator membentuk sisi primer dan rotor sebagai sisi sekunder.

### 5.6.3.1 Rangkaian Ekuivalen Rotor



Gambar 5.102 Rangkaian Ekuivalen Rotor

Pada saat rotor berputar tegangan induksi rotor ( $E_2$ ) dan reaktansi bocor rotor ( $X_2$ ) dipengaruhi oleh Slip, maka arus rotor menjadi :

$$I_2 = \frac{E_2 \cdot S}{\sqrt{R_2' + (S \cdot X_2)^2}}$$

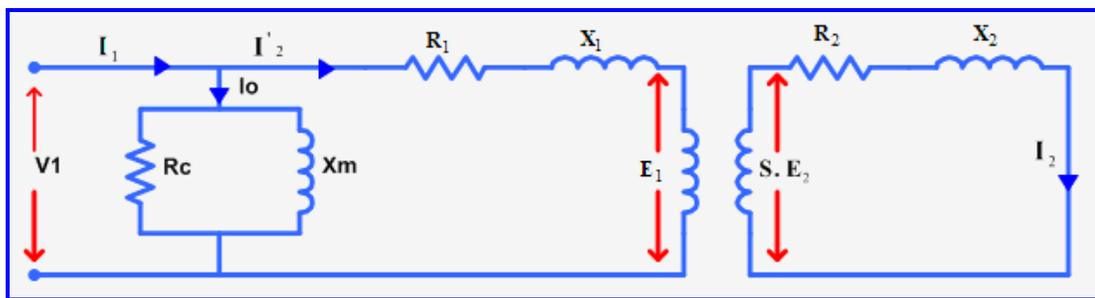
$$= \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + X_2^2}}$$

$$= \frac{R_2}{S} = R_2 + R_2 \left(\frac{1}{S} - 1\right)$$

dimana  $R_2$  = Resistansi Rotor

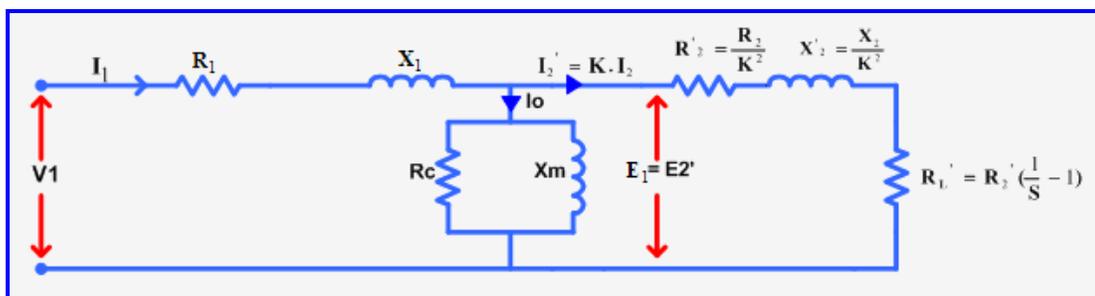
$R_2 \left(\frac{1}{S} - 1\right)$  = Resistansi Beban

### 5.6.3.2 Rangkaian Ekuivalen Motor



Gambar 5.103 Rangkaian Ekuivalen Motor

Gambar rangkaian ekuivalen pada gambar 5.102 bisa disederhanakan lagi dengan merefrensikannya pada sisi primer (stator) seperti terlihat pada gambar 5.103



Gambar 5.104 Rangkaian Ekuivalen dengan Refrensi Primer

## 5.6.4 Torsi dan Daya

Seperti telah dibahas pada sub bab mengenai konstruksi dan prinsip kerja motor induksi, tidak ada suplai listrik yang dihubungkan secara langsung ke bagian rotor motor, daya yang dilewatkan senjang udara adalah dalam bentuk magnetik dan selanjutnya diinduksikan ke rotor sehingga menjadi energi listrik. Rata-rata daya yang melewati senjang udara harus sama dengan jumlah rugi daya yang terjadi pada rotor dan daya yang dikonversi menjadi energi mekanis.

Daya yang ada pada bagian rotor menghasilkan torsi mekanik, tetapi besarnya torsi yang terjadi pada poros motor dimana tempat diletakkannya beban, tidak sama dengan besarnya torsi mekanik, hal ini disebabkan adanya torsi yang hilang akibat gesekan dan angin.

### 5.6.4.1 Torsi Motor

#### ➤Torsi Asut (Starting Torque)

Torsi yang dihasilkan oleh sebuah motor pada saat mulai diasut disebut *Torsi Asut*, nilainya bisa lebih besar atau lebih kecil dari Torsi putar dalam keadaan normal.

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

$$\text{Cos}\phi = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

Torsi Asut  $T_s = k.E_2.I_2.\text{Cos}\phi_2$

atau

$$T_s = k.E_2 \cdot \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \times \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

$$= \frac{k.E_2^2.R_2}{R_2^2 + X_2^2}$$

#### ➤Torsi saat Rotor(Motor) Berputar

Pada saat motor berputar, maka :

$$T \propto E_{2r}.I_{2r}.\text{Cos}\phi_2$$

dimana :

$E_{2r}$  = Tegangan rotor / fasa saat berputar

$I_{2r}$  = Arus rotor/fasa saat berputar

$$E_{2r} = S.E_2$$

$$I_{2r} = \frac{E_{2r}}{Z_{2r}} = \frac{S.E_2}{\sqrt{(R_2)^2 + (X_2.S)^2}}$$

$$\text{Cos}\phi_{2r} = \frac{R_2}{\sqrt{(R_2)^2 + (S.X_2)^2}}$$

$$T \propto \frac{k.S.E_2^2.R_2}{R_2^2 + (S.X_2)^2}$$

$$k = \text{konstanta, nilainya} = \frac{3}{2.\pi.Ns}$$

$$T = \frac{3}{2.\pi.Ns} \times \frac{S.E_2^2.R_2}{R_2^2 + (S.X_2)^2}$$

#### ➤Torsi Maksimum saat Motor Berputar

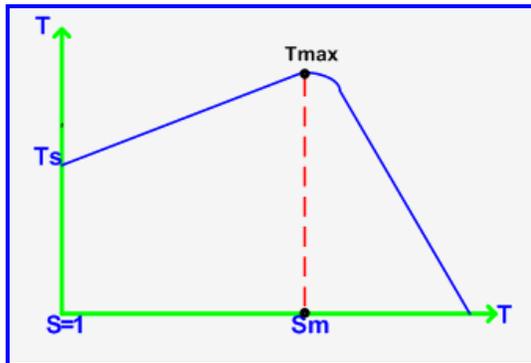
Kondisi *Torsi Maksimum* pada saat motor berputar bisa diperoleh dengan mendeferen-tialkan persamaan Torsi terhadap Slip S.

$$\text{Torsi Maksimum} \Rightarrow \frac{dT}{dS} = 0$$

Berdasarkan hasil diferensial ini akan diperoleh ;

$$S_m = \frac{R_2}{X_2}$$

$$\begin{aligned} T_{\max} &= \frac{k \cdot S \cdot E_2^2 \cdot R_2}{R_2^2 + S^2 \cdot X_2^2} \\ &= \frac{k \cdot \frac{R_2}{X_2} \cdot E_2^2 \cdot R_2}{R_2 + \left(\frac{R_2}{X_2}\right)^2 \cdot X_2} \\ &= \frac{k \cdot E_2^2}{2 \cdot X_2} \end{aligned}$$



Gambar 5.105 Karakteristik Slip Vs Torsi

### ➤ Torsi Beban Penuh dan Torsi Maksimum

$$T_f = \frac{k \cdot S \cdot R_2 \cdot E_2^2}{R_2^2 + S^2 \cdot X_2^2}$$

$$T_{\max} = \frac{k \cdot E_2^2}{2 \cdot X_2}$$

$$\therefore \frac{T_f}{T_{\max}} = \frac{k \cdot S \cdot R_2 \cdot E_2^2}{R_2^2 + S^2 \cdot X_2^2} \times \frac{2 \cdot X_2}{k \cdot E_2^2}$$

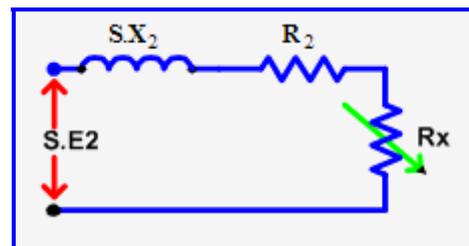
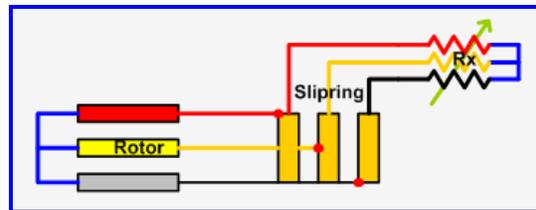
$$\begin{aligned} &= \frac{2 \cdot S \cdot \frac{R_2}{X_2}}{\left(\frac{R_2}{X_2}\right)^2 + S^2} = \frac{2}{\frac{S_m}{S} + \frac{S}{S_m}} \end{aligned}$$

### ➤ Torsi Asut dan Torsi Maksimum

$$\begin{aligned} \frac{T_s}{T_{\max}} &= \frac{k \cdot R_2 \cdot E_2^2}{R_2^2 + X_2^2} \times \frac{2 \cdot X_2}{k \cdot E_2^2} = \frac{2 \cdot R_2 \cdot X_2}{R_2^2 + X_2^2} \\ &= \frac{2 \cdot \frac{R_2}{X_2}}{1 + \left(\frac{R_2}{X_2}\right)^2} = \frac{2 \cdot S_m}{1 + S_m^2} \end{aligned}$$

### ➤ Torsi pada Rotor Lilit

Untuk menentukan Arus, daya, dan Torsi pada Motor Induksi rotor lilit tidak berbeda dengan rotor sangkar, hanya pada rotor lilit kita bisa menambahkan tahanan luar terhadap bagian rotor tersebut.



Gambar 5.106 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Rotor Lilit

- Saat Pengasutan  $S = 1$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2 + R_x)^2 + (X_2)^2}} \text{ Ampere}$$

$$\text{Cos}\phi_2 = \frac{R_2 + R_x}{\sqrt{(R_2 + R_x)^2 + (X_2)^2}}$$

$$T = \frac{k.E_2^2 \cdot (R_2 + R_x)}{(R_2 + R_x)^2 + (X_2)^2} \text{ N-m}$$

- Saat Berputar

$$I_2 = \frac{S.E_2}{\sqrt{(R_2 + R_x)^2 + (S.X_2)^2}} \text{ Ampere}$$

$$\text{Cos}\phi_2 = \frac{R_2 + R_x}{\sqrt{(R_2 + R_x)^2 + (S.X_2)^2}}$$

$$T = \frac{k.S.E_2^2 \cdot (R_2 + R_x)}{(R_2 + R_x)^2 + (S.X_2)^2} \text{ N-m}$$

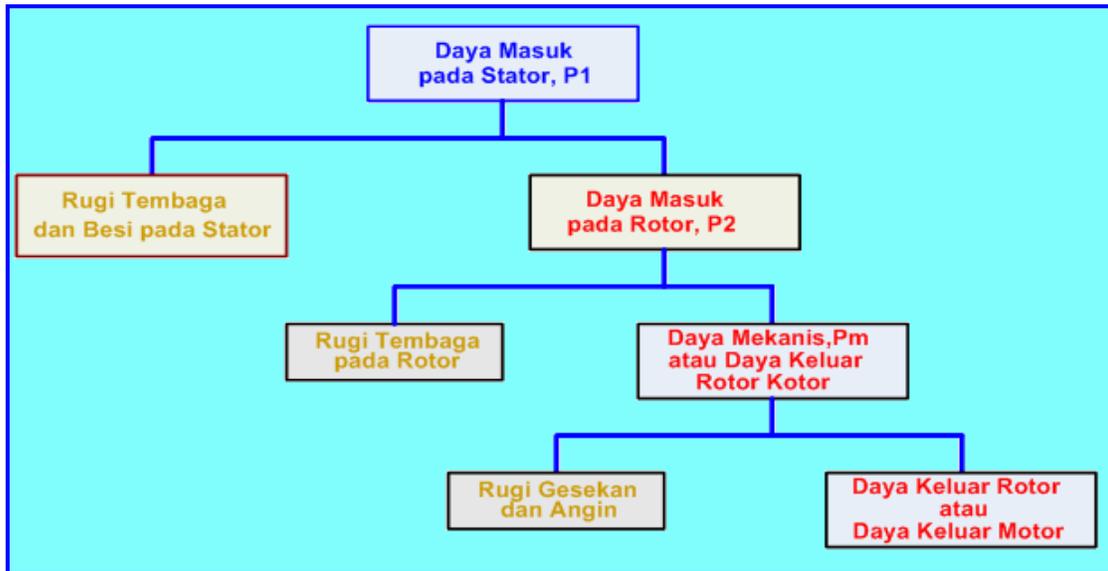
### 5.6.4.1 Daya Motor Induksi Tiga Fasa

Diagram aliran daya dari sebuah Motor Induksi Tiga Fasa seperti diperlihatkan pada gambar 5.106

Daya Masuk Stator = Daya Keluar Stator + Rugi Tembaga Stator

Daya Masuk Rotor = Daya Keluar Stator

Daya Keluar Rotor Kotor = Daya Masuk Rotor - Rugi Tembaga Rotor



Gambar 5.107 Diagram Aliran Daya Motor Induksi Tiga Fasa

Daya keluar rotor dikonversi ke dalam energi mekanis dan menghasilkan *Torsi Tg*. Sebagian torsi yang dihasilkan *Tg* hilang karena *gesekan dan angin* di rotor disebut *Torsi Poros Tsh*.

Keterangan :

Daya Keluar Rotor kotor =  $P_{out\_rotor}$

Daya Masuk Rotor =  $P_{in\_rotor}$

Rugi Tembaga Rotor =  $P_{cu\_rotor}$

$P_{out\_rotor} = Tg \cdot 2 \cdot \pi \cdot Nr$

$$Tg = \frac{P_{out\_rotor}}{2 \cdot \pi \cdot Nr}$$

$P_{in\_rotor} = Tg \cdot 2 \cdot \pi \cdot Ns$

$P_{cu\_rotor} = Tg \cdot 2 \cdot \pi \cdot (Ns - Nr)$

$$\frac{P_{cu\_rotor}}{P_{in\_rotor}} = \frac{Tg \cdot 2 \cdot \pi \cdot (Ns - Nr)}{Tg \cdot 2 \cdot \pi \cdot Ns}$$

$$= \frac{Ns - Nr}{Ns} = S$$

$P_{cu\_rotor} = S \cdot P_{in\_rotor}$

$P_{out\_rotor} = P_{in\_rotor} - P_{cu\_rotor}$   
 $= P_{in\_rotor} - S \cdot P_{in\_rotor}$

$$\frac{P_{out\_rotor}}{P_{in\_rotor}} = 1 - S$$

$$= 1 - \frac{Ns - Nr}{Ns}$$

$$= \frac{Ns}{Ns} - \frac{Ns - Nr}{Ns} = \frac{Nr}{Ns}$$

Efisiensi Rotor =  $\frac{Nr}{Ns}$

Juga  $\frac{P_{cu\_rotor}}{P_{out\_rotor}} = \frac{S \cdot P_{in\_rotor}}{(1 - S) \cdot P_{in\_rotor}}$   
 $= \frac{S}{1 - S}$

Rugi Tembaga Rotor untuk Sistem Tiga Fasa, adalah :

$$P_{cu} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2$$

$$= \frac{3 \cdot S^2 \cdot E_2^2 \cdot R_2}{R_2^2 + S^2 \cdot X_2^2} \text{ Watt}$$

$$P_{in\_rotor} \cdot P_2 = \frac{P_{cu\_rotor}}{S}$$

$$= \frac{3 \cdot S^2 \cdot E_2^2 \cdot R_2}{R_2^2 + S^2 \cdot X_2^2} \cdot \frac{1}{S}$$

$$= \frac{3 \cdot S \cdot E_2^2 \cdot R_2}{R_2^2 + S^2 \cdot X_2^2}$$

Daya Mekanik (Pm) atau

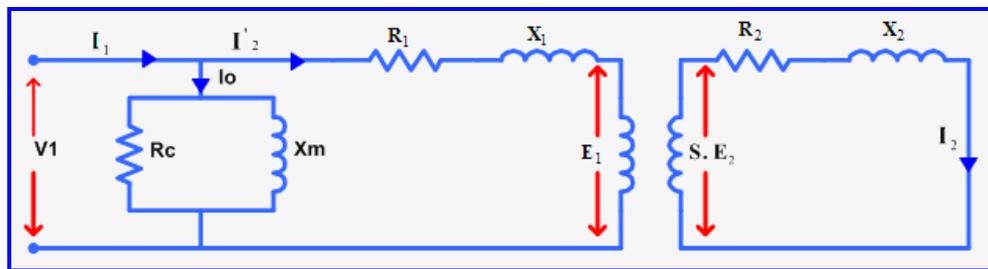
$P_{out\_rotor} = (1 - S) \cdot P_{in\_rotor}$

$$\frac{3 \cdot S(1 - S) \cdot E_2^2 \cdot R_2}{R_2^2 + S^2 \cdot X_2^2} \text{ Watt}$$

$$Tg = \frac{P_m}{\omega} = \frac{P_m}{2 \pi Nr / 60}$$

$$= \frac{P_m}{2 \cdot \pi \cdot Ns(1 - S) / 60}$$

$$= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Ns / 60} \cdot \frac{3 \cdot S \cdot E_2^2 \cdot R_2}{R_2^2 + (S \cdot X_2)^2} \text{ N - m}$$



Gambar 5.108 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

Menentukan Torsi dan daya pada motor induksi tiga fasa, bisa dilakukan pula berdasarkan rangkaian ekuivalen (Gambar 5.107).

$$P_{in\text{ Stator}} = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1 \text{ Watt}$$

$$R_{ugi\text{ Inti}} = I_c^2 \cdot R_c$$

$$P_{cu\text{ stator}} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \text{ Watt}$$

$$\text{Dayayang Ditransfer ke Rotor} =$$

$$3 \cdot (I_2')^2 \cdot \frac{R_2'}{S} \text{ Watt}$$

$$P_{cu\text{ rotor}} = 3 \cdot (I_2')^2 \cdot R_2' \text{ Watt}$$

$$\text{Daya Mekanik } P_m = P_{in\text{ rotor}} - P_{cu\text{ rotor}}$$

$$= 3(I_2')^2 \frac{R_2'}{S} - 3(I_2')^2 \cdot R_2'$$

$$= 3(I_2')^2 \cdot R_2' \left( \frac{1-S}{S} \right) \text{ Watt}$$

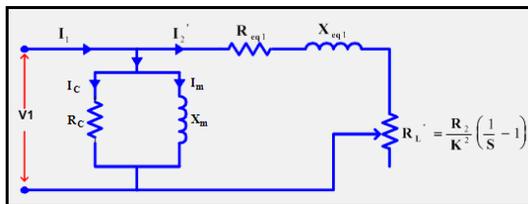
$$T_g \times \omega = T_g \times 2\pi \cdot N_r / 60$$

$$= 3 \cdot (I_2')^2 \cdot R_2' \left( \frac{1-S}{S} \right)$$

$$T_g = \frac{3(I_2')^2 \cdot R_2' \left( \frac{1-S}{S} \right)}{2\pi \cdot N_r / 60}$$

karena  $N_r = N_s(1-S)$ , maka

$$T_g = \frac{3(I_2')^2 \cdot R_2'}{2\pi \cdot N_s / 60}$$



Gambar 5.109 Rangkaian Ekuivalen dengan Refrensi Stator

$$I_2' = \frac{V_1}{\left( R_1 + \frac{R_2'}{S} \right) + j(X_1 + X_2')}$$

$$T_g = \frac{3}{2\pi \cdot N_s / 60} \times$$

$$\dots \frac{V_1^2}{\left( R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2} \times \frac{R_2'}{S} N - m$$

bila harga lo diabaikan  $\Rightarrow I_1 = I_2$

$$\text{Daya Keluar Motor } P_g(\text{Pout}) = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_L$$

$$I_1 = \frac{V_1}{\sqrt{(R_{eq1} + R_L)^2 + X_{eq1}^2}}$$

$$P_g = \frac{3 \cdot V_1^2 \cdot R_L}{(R_{eq1} + R_L)^2 + X_{eq1}^2}, \text{ kdiasumsikan } = 1$$

Daya Keluar Motor akan maksimum,

bila :  $R_L = Z_{eq1}$

$$P_{g\text{ max}} = \frac{3 \cdot V_1^2 \cdot Z_{eq1}}{(R_{eq1} + Z_{eq1})^2 + X_{eq1}^2}$$

$$= \frac{3 \cdot V_1^2}{2(R_{eq1} + Z_{eq1})}$$

## 5.6.5 Penentuan Parameter Motor Induksi

Parameter dari rangkaian ekuivalen  $R_c, X_m, R_1, X_1, X_2, \text{ dan } R_2$ , dapat ditentukan berdasarkan hasil tes tanpa beban, tes hubung singkat, dan dari pengukuran tahanan dc dari belitan stator.

Tes tanpa beban pada motor induksi, seperti tes tanpa beban pada sebuah transformator, yang hasilnya memberikan informasi nilai arus magnetisasi dan rugi gesekan.

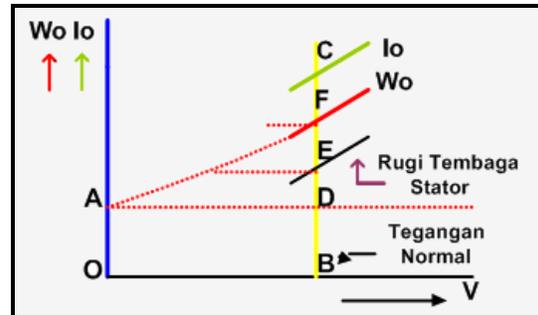
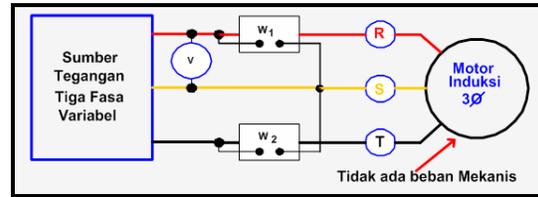
Tes ini dilakukan dengan memberikan tegangan tiga fasa seimbang pada belitan stator pada rating frekuensinya. Bagian rotor pada kondisi pengetesan jangan terhubung dengan beban mekanis, rugi daya yang terukur pada kondisi tes tanpa beban disebabkan rugi inti, rugi gesekan dan angin.

Tes hubung singkat pada motor induksi, seperti tes hubung singkat pada transformator, yang hasilnya memberikan informasi kerugian karena impedansi. Pada tes ini rotor ditahan sehingga motor tidak bisa berputar. Untuk menghindari hal-hal yang tidak ingin selama pengetesan biasanya tegangan yang diberikan hanya 15% - 20% dari tegangan normal motor, sedangkan untuk mendapatkan nilai parameter motor, tetap berdasarkan nilai nominalnya dengan melakukan konversi dari hasil pengukuran.

Hasil pengetesan terhadap motor ini selain untuk menentukan parameter, dapat dimanfaatkan juga untuk menggambarkan diag-ram lingkaran. Rugi-rugi tembaga stator dan rotor dapat dipisahkan dengan menggambarkan garis torsi.

### 5.6.5.1 Tes Tanpa Beban

Test tanpa beban dilakukan pada motor induksi tiga fasa untuk memperoleh data daya masuk  $W_0$ ,  $I_0$ , dan  $V_0$  (V) seperti yang diperlihatkan pada gambar 5.109 Pada gambar 5.109 b, kurva  $W_0$  terpotong sumbu vertikal pada titik A.



Gambar 5.110 Tes Tanpa Beban

OA=Menunjukkan rugi-rugi yang disebabkan gesekan dan angin.

Besarnya nilai  $W_0$  yang terbaca pada saat tes tanpa beban, menunjukkan nilai kerugian yang diakibatkan oleh adanya :

- Rugi tembaga Stator  $3.I_0^2.R_1$ .
- Rugi Inti  $3.G_0.V^2$ .
- Rugi disebabkan gesekan dan angin.

OB Menunjukkan tegangan normal, sehingga rugi-rugi pada tegangan normal dapat diketahui dengan menggambarkan garis vertikal dari titik B.

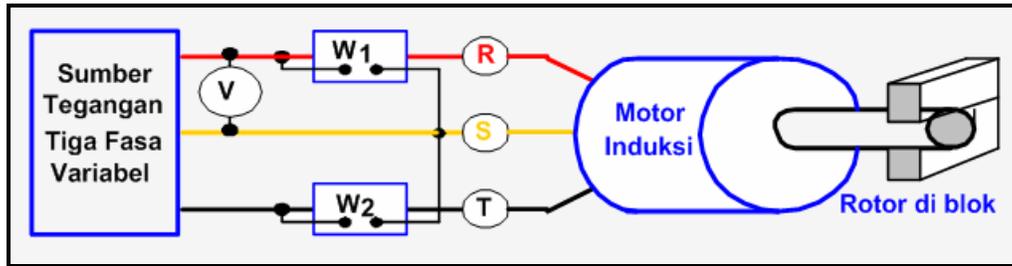
BD = Rugi disebabkan gesekan dan angin.

DE = Rugi tembaga stator.

EF = Rugi inti

$$\cos\phi_0 = \frac{W_0}{\sqrt{3}.V.I_0}$$

### 5.6.5.2 Tes Hubung Singkat



Gambar 5.111 Tes Hubung Singkat

Tes ini dilakukan untuk :

- Arus hubung singkat saat tegangan normal diberikan pada stator.
- Faktor daya pada saat hubung singkat.
- Reaktansi total  $X_{eq1}$  dari motor dengan referensi sisi primer (stator).
- Resistansi total  $R_{eq1}$  dari motor dengan referensi sisi primer.

Pada saat test dilakukan rotor ditahan dan untuk jenis rotor belitan, kumparan rotor dihubung singkat pada slipring.

Kurangi tegangan suplai ( $\pm 5$  atau  $20\%$  dari tegangan normal) dan diatur sampai arus beban penuh mengalir dalam stator. Pada saat pengetesan dilakukan catat nilai arus, tegangan, dan daya masuk yang terukur.

$$I_{hsN} = I_{hs} \times \frac{V}{V_{hs}}$$

$I_{hsN}$  = Arus hubung singkat diperoleh saat tegangan normal diberikan.

$I_{hs}$  = Arus hubung singkat diperoleh saat tegangan pengujian diberikan.

$$W_{hs} = \sqrt{3} \cdot V_{hsL} \cdot I_{hsL} \cdot \cos\phi_{hs}$$

$$\cos\phi_{hs} = \frac{W_{hs}}{\sqrt{3} \cdot V_{hsL} \cdot I_{hsL}}$$

$W_{hs}$  = Total daya masuk saat hubung Singkat

$V_{hsL}$  = Tegangan Jala-jala saat hubung Singkat.

$I_{hsL}$  = Arus Jala-jala saat hubung singkat

$$\text{Rugi Tembaga Total} = W_{hs} - W_{inti}$$

$$3 \cdot I_{hs}^2 \cdot R_{eq1} = W_{hs} - W_{inti}$$

$$\therefore R_{eq1} = \frac{W_{hs} - W_{inti}}{3 \cdot I_{hs}^2}$$

$$Z_{eq1} = \frac{V_{hs}}{I_{hs}} \quad \therefore X_{eq1} = \sqrt{Z_{eq1}^2 - R_{eq1}^2}$$

### 5.6.6 Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi akan berputar pada kecepatan konstan saat dihubungkan pada tegangan dan frekuensi yang konstan, kecepatannya sangat mendekati kecepatan sinkronnya. Bila torsi beban bertambah, maka kecepatannya akan sedikit mengalami penurunan, sehingga motor induksi sangat cocok digunakan menggerakkan sistem yang membutuhkan kecepatan konstan.

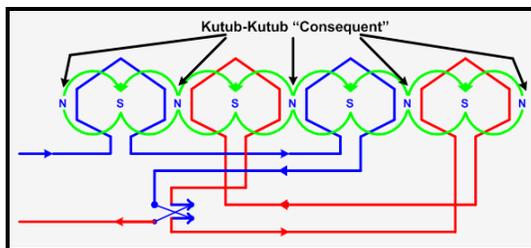
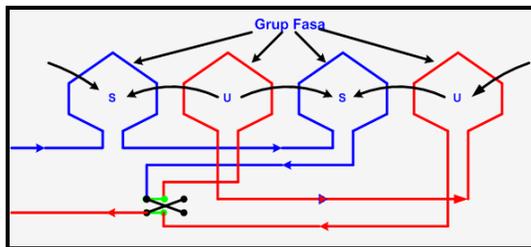
Namun dalam kenyataannya terutama di industri terkadang dikehendaki juga ada-

nya pengaturan kecepatan. Pengaturan kecepatan sebuah motor induksi memerlukan biaya yang relatif mahal. Pengaturan kecepatan dapat dilakukan dengan beberapa cara, seperti dengan mengubah jumlah kutub, mengatur tahanan luar, mengatur tegangan jala-jala, dan mengatur frekuensi jala-jala.

### 5.6.6.1 Mengubah Jumlah Kutub

Karena kecepatan operasi motor induksi mendekati kecepatan sinkron, maka kecepatan motor dapat diubah dengan cara mengubah jumlah kutubnya, sesuai dengan persamaan : 
$$N_s = \frac{120f}{P}$$

Hal ini dapat dilakukan dengan mengubah hubungan lilitan dari kumparan stator motor. Normalnya diperoleh dua perubahan kecepatan sinkron dengan mengubah jumlah kutub, misalnya dari 2 kutub menjadi 4 kutub. Dengan cara ini perubahan kecepatan yang dihasilkan hanya dalam "discrete steps".

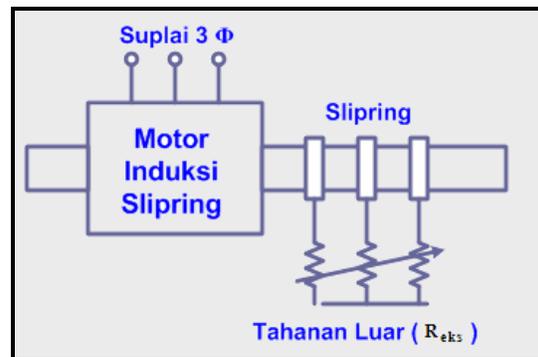


Gambar 5.112 Mengubah Jumlah Kutub

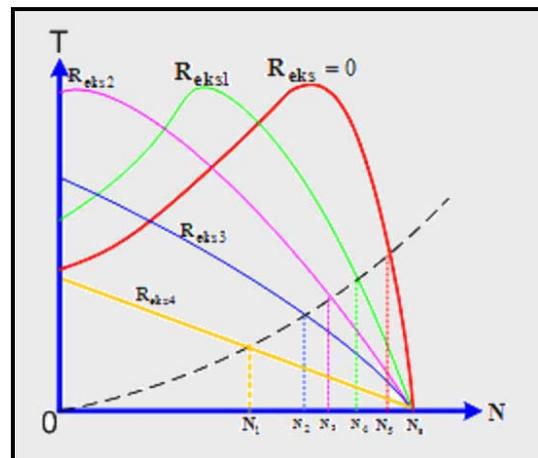
### 5.6.6.2 Pengaturan Tahanan Rotor

Pengaturan kecepatan putaran dengan cara pengaturan tahanan luar hanya bisa dilakukan pada motor induksi rotor belitan, dengan cara menghubungkan tahanan luar ke dalam rangkaian rotor melalui slipring.

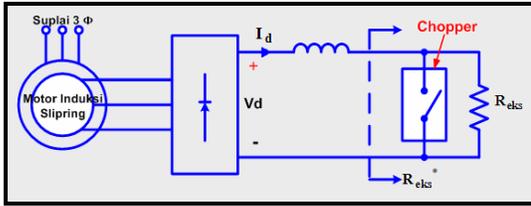
Pengaturan tahanan secara manual terkadang kurang sempurna untuk beberapa jenis penggunaan, seperti sistem kontrol umpan balik. Kontrol dengan memanfaatkan komponen elektronik pada tahanan luar akan lebih memperhalus operasi pengaturan.



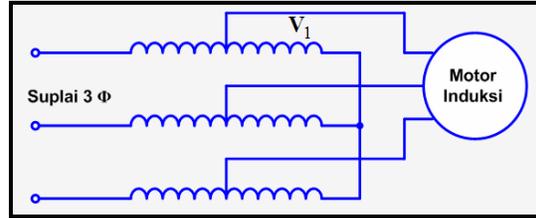
a. Rangkaian Tahanan Rotor



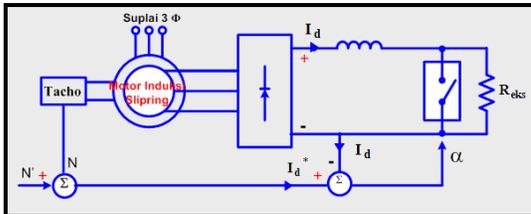
b. Kurva Pengaturan Tahanan



c. Pengaturan Secara Elektronis

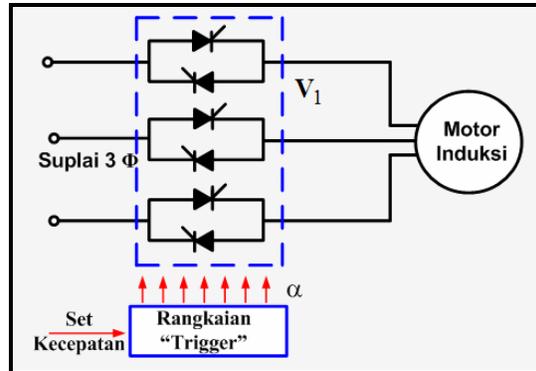


(a)



d. Pengaturan dengan lup Tertutup

Gambar 5.113 Pengaturan Tahanan Rotor Motor



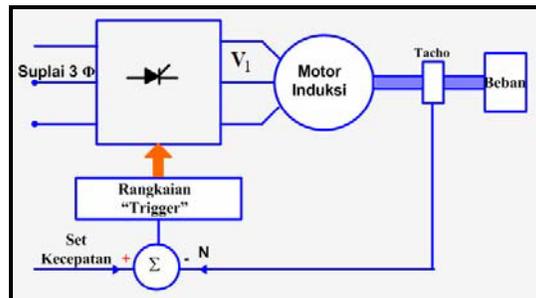
(b)

### 5.6.6.3 Pengaturan Tegangan

Untuk melakukan pengaturan kecepatan dengan daerah pengaturan yang sempit pada motor induksi rotor sangkar dapat dilakukan dengan cara menurunkan (mengatur) besarnya tegangan masukan.

Perlu diperhatikan pengaturan kecepatan seperti ini bisa menyebabkan naiknya slip, sehingga efisiensi menurun dengan menurunnya kecepatan, dan pemanasan berlebihan pada motor bisa menimbulkan masalah.

Pengaturan tegangan untuk mengatur kecepatan dapat diimplementasikan dengan mensuplai kumparan stator dari sisi sekunder autotransformator yang bisa diatur atau dengan komponen elektronik seperti rangkaian thyristor yang biasa disebut "voltage controller".



(c)

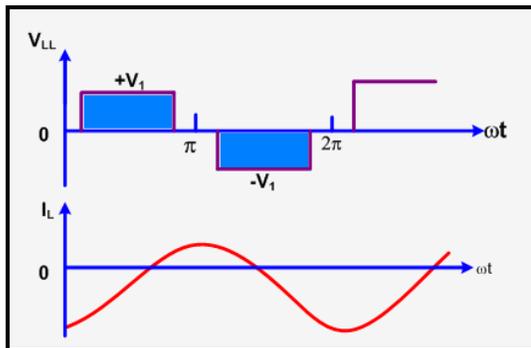
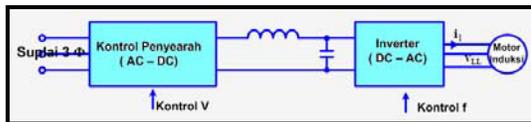
Gambar 5.114 Pengaturan Tegangan

### 5.6.6.4 Pengaturan Frekuensi

Pengaturan putaran motor induksi dapat dilakukan dengan mengatur nilai frekuensi jala-jala. Aplikasi metoda pengaturan kecepatan ini memerlukan sebuah pengubah frekuensi.

Gambar 5.113 memperlihatkan blok diagram sistem pengaturan kecepatan umpan terbuka (open loop), frekuensi sup-lai ke motor dapat diatur (diubah-ubah).

Untuk menghindari saturasi yang tinggi dalam magnetik, tegangan terminal ke motor harus bervariasi sebanding dengan frekuensi.



Gambar 5.115 Skema Pengaturan Frekuensi

## 5.6.7 Pemilihan Motor

Sebelum menggunakan motor listrik untuk menggerakkan suatu beban, maka terlebih dahulu kita harus mengetahui karakteristik beban yang akan digerakan tersebut, seperti :

- Apakah beban akan terhubung langsung ke poros motor ?
- Berapa besarnya daya yang dibutuhkan ?
- Bagaimana hubungan torsi beban dengan kecepatan ?
- Berapa besar torsi asut, torsi kecepatan, torsi maksimum yang dibutuhkan ?

➤ Dimana motor akan diletakan ?

dan masih banyak lagi hal-hal yang harus dijadikan acuan sebelum kita memilih motor listrik, supaya motor dapat menggerakkan beban secara optimal dan efisien.

Berikut ini beberapa faktor/standar yang dapat dijadikan pertimbangan dalam memilih motor, supaya sesuai dengan kebutuhan beban.

➤ Faktor Pelayanan (*Service Faktor*)

Motor induksi tersedia dengan berbagai tipe dan ukuran daya, apabila motor mempunyai faktor pelayanan (service faktor = SF) 1,15, hal ini menunjukkan bahwa motor dapat beroperasi pada 115% beban secara terus menerus, walaupun beroperasi pada efisiensi yang lebih rendah dari yang seharusnya. Penggunaan motor dengan beban lebih sesuai SF untuk jangka waktu tertentu biasanya menjadi alternatif pengguna motor, daripada harus membeli motor dengan daya yang lebih besar.

➤ Penutup Motor

Penutup motor dirancang untuk memberikan perlindungan terhadap bagian-bagian yang ada didalam motor, tergantung pada lingkungan dimana motor tersebut akan dipergunakan. Beberapa jenis penutup yang umum dipergunakan adalah :

- ❖ ODP (Open Drip-Proof), jenis ODP digunakan pada lingkungan yang bersih dan memberikan toleransi terhadap tetesan cairan tidak lebih besar 15°secara vertikal. Pendinginan untuk motor memanfaatkan udara sekitarnya.

- ❖ TEFC(Totally Enclosed Fan Cooled), motor dengan penutup jenis ini digunakan untuk lingkungan yang berdebu dan korosif. Motor didinginkan oleh kipas angin eksternal.

➤ Klasifikasi Karakteristik Torsi Motor

NEMA (National Electrical Manufacturers Association) telah membuat standarisasi untuk motor induksi berdasarkan karakteristik torsi, yaitu rancangan A, B, C, D, dan F. Tabel 5.6 memperlihatkan karakteristik torsi motor berdasarkan standar NEMA.

Tabel 5.6 Karakteristik Torsi Motor Induksi

Desain	Torsi Asut	Arus Asut	Slip Beban Penuh	Torsi Patah
A	N	N	R	LT
B	N	N	R	N
C	T	N	R	N
D	T	R	T	T
F	R	R	R	R

Ket : N = Normal, T =Tinggi,  
R = Rendah, LT= Lebih Tinggi

Motor induksi rotor sangkar adalah motor yang paling sederhana karena bagian rotornya tidak ada sikat. Motor induksi rotor sangkar (desain B) umumnya dipergunakan untuk menggerakkan kipas, pompa sentrifugal, dan sebagainya.

Motor induksi dengan torsi asut tinggi (desain C) digunakan apabila diperlukan torsi pengasutan tinggi, seperti elevator dan kerekan yang harus diasut dalam keadaan berbeban. Motor jenis ini umumnya mempunyai rotor sangkar ganda.

Motor induksi desain D dirancang untuk mempunyai torsi asut tinggi dengan arus asut rendah. Motor jenis ini mempunyai

tahanan rotor tinggi yang dibuat dari kuningan, motor bekerja antara 85% s.d 95% dari kecepatan sinkronnya.

Motor dengan desain D biasanya dipergunakan untuk menggerakkan beban yang mempunyai kelembaman tinggi, sehingga membutuhkan waktu yang relatif lama untuk mencapai kecepatan penuh.

➤ Klasifikasi Isolasi Motor

Isolasi motor diklasifikasikan dengan huruf, sesuai dengan kemampuannya terhadap suhu untuk bisa bertahan tanpa mengakibatkan penurunan karakteristik yang serius. Tabel 5.7 memperlihatkan kenaikan suhu diatas suhu kamar berdasarkan klas isolasi. Jenis isolasi motor yang paling umum digunakan adalah klas B.

Tabel 5.7 Klasifikasi Isolasi Motor

	Isolasi		
	Klas B	Klas F	Klas H
Motor tanpa SF	80°C	105°C	125°C
Motor dengan SF 1,15	90°C	115°C	135°C

## 5.7 Generator Sinkron

### 5.7.1 Pendahuluan

Sebagian besar energi listrik yang dipergunakan oleh konsumen untuk kebutuhan sehari-hari dihasilkan oleh generator sinkron fasa banyak (polyphase) yang ada di Pusat-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 adalah adanya pembagian beban antara generator yang satu dengan lainnya.

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 AC*. Hampir semua mesin sinkron mempunyai jangkar diam (stationer) dan struktur medan berputar. Kumparan DC pada struktur medan yang berputar dihubungkan pada sumber luar melalui slipring dan sikat, tetapi ada juga

yang tidak mempergunakan sikat yaitu sistem "brushless excitation".

### 5.7.2 Konstruksi

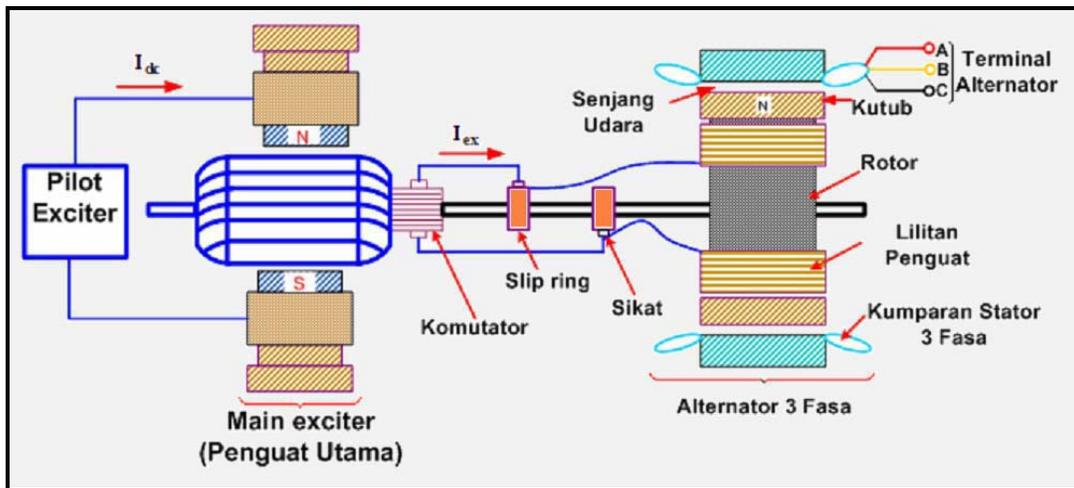
Ada dua struktur medan magnet pada mesin sinkron yang merupakan dasar kerja dari mesin tersebut, yaitu *kumparan yang mengalirkan penguatan DC dan sebuah jangkar tempat dibangkitkannya ggl AC*. Hampir semua mesin sinkron mempunyai jangkar diam (stationer) dan struktur medan berputar. Kumparan DC pada struktur medan yang berputar dihubungkan pada sumber luar melalui slipring dan sikat, tetapi ada juga yang tidak mempergunakan sikat yaitu sistem "brushless excitation".

Konstruksi dari sebuah mesin sinkron secara garis besar adalah sebagai berikut :

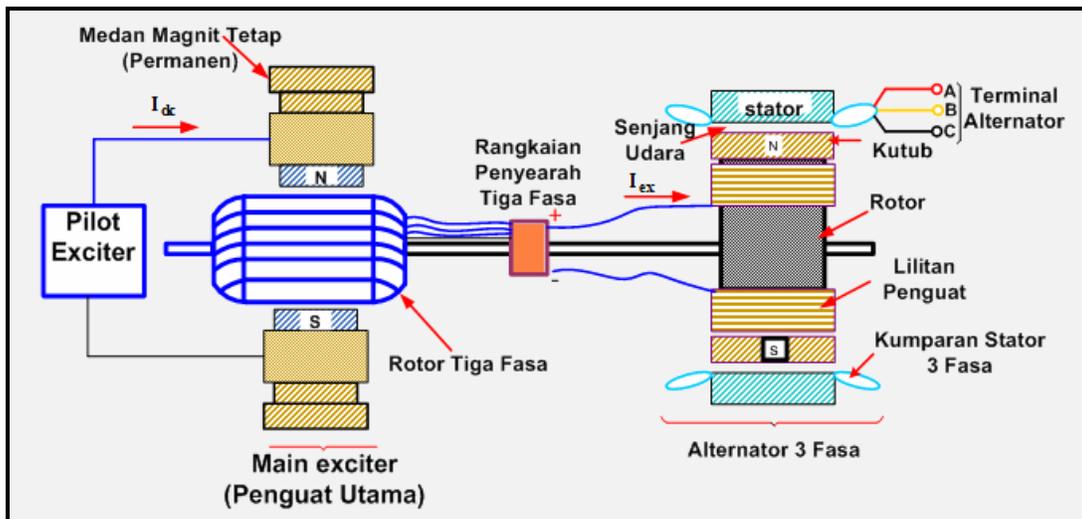
#### ◆ Bentuk Penguatan

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 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 (penguatan aktif).



Gambar 5.116  
Generator Sinkron Tiga Fasa dengan Penguatan Generator DC "Pilot Exciter"



Gambar 5.117  
Generator Sinkron Tiga Fasa dengan Sistem Penguatan "Brushless Exciter System"

Alternatif lainnya untuk penguatan adalah menggunakan dioda silikon dan thyristor. Dua tipe sistem penguatan "Solid state" adalah :

- Sistem statis yang mempunyai dioda atau thyristor statis, dan arus dialirkan ke rotor melalui Slipring.
- "Brushless System", pada sistem ini penyearah diletakkan diporos yang

berputar dengan rotor, sehingga tidak dibutuhkan sikat dan slipring.

#### • Bentuk Rotor

Untuk medan rotor yang digunakan tergantung pada kecepatan mesin, mesin dengan kecepatan tinggi seperti turbo generator mempunyai bentuk silinder, sedangkan mesin dengan kecepatan

rendah seperti Hydroelectric atau Generator Listrik-Diesel mempunyai rotor Kutub Tonjol.

◆ **Stator**

Stator dari mesin sinkron terbuat dari besi magnetik yang berbentuk laminasi untuk mengurangi rugi-rugi arus pusar. Dengan inti magnetik yang bagus berarti permeabilitas dan resistivitas dari bahan tinggi.

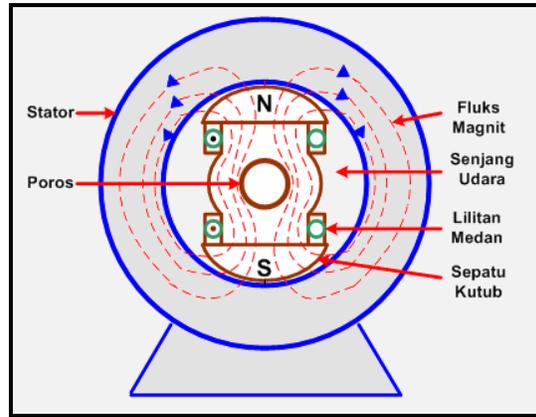
Gambar 5.119 memperlihatkan alur stator tempat kumparan jangkar. Belitan jangkar (stator) yang umum digunakan oleh mesin Sinkron Tiga Fasa, ada dua tipe yaitu :

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

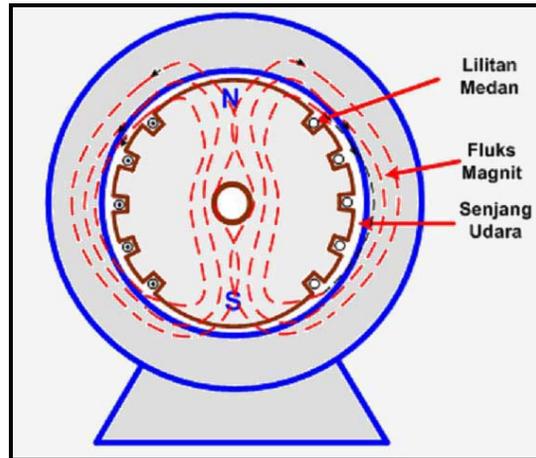
❖ **Belitan Stator Satu Lapis**

Gambar 5.120 yang memperlihatkan belitan satu lapis karena hanya ada satu sisi lilitan didalam masing-masing alur. Bila kumparan tiga fasa 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 fasa dipisahkan sebesar 120 derajat listrik atau 60 derajat mekanis, 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 :

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

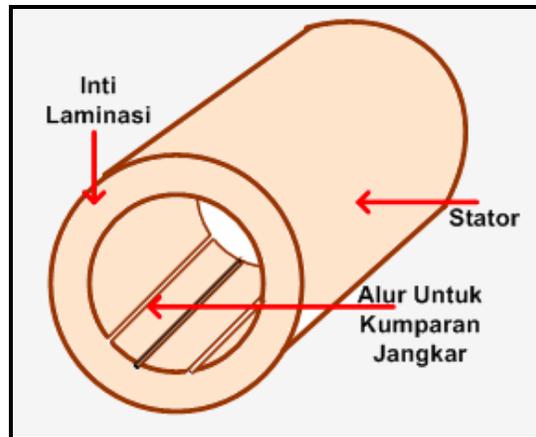


(a) Kutub Tonjol

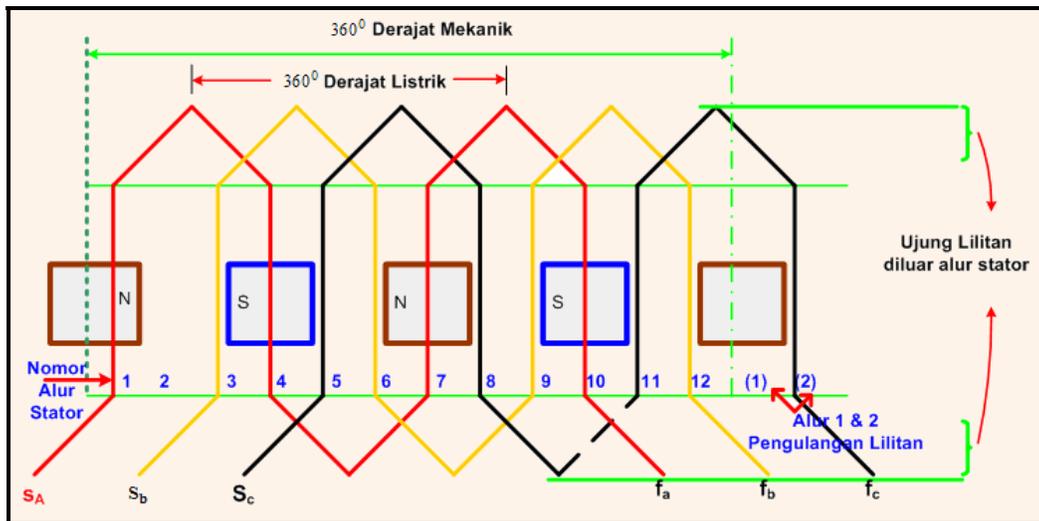


(b) Silinder

Gambar 5.118 Bentuk Rotor



Gambar 5.119 Inti Stator dan Alur pada Stator



Gambar 5.120 Belitan Satu Lapis Generator Sinkron Tiga Fasa

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

Jawab :

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 :

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

Untuk menunjukkan arah dari putaran rotor gambar 5.119 (searah jarum jam), urutan fasa yang dihasilkan oleh suplai tiga fasa adalah ABC, dengan demikian tegangan maksimum pertama terjadi dalam fasa A, diikuti fasa B, dan kemudian fasa C.

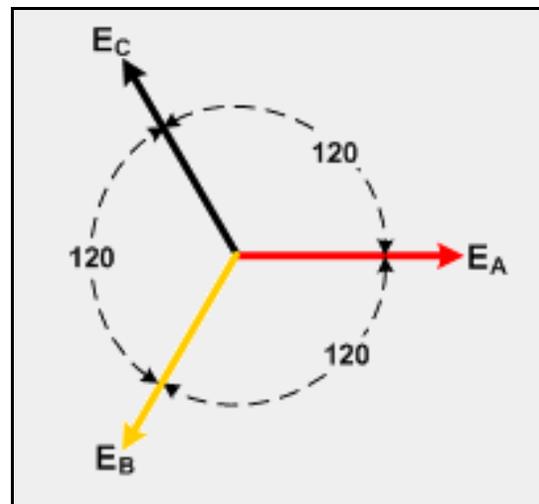
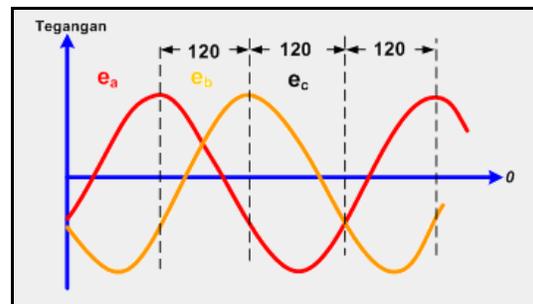
Kebalikan arah putaran dihasilkan dalam urutan ACB, atau urutan fasa negatif, sedangkan urutan fasa ABC disebut urutan fasa positif.

Jadi ggl yang dibangkitkan sistem tiga fasa secara simetris adalah :

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

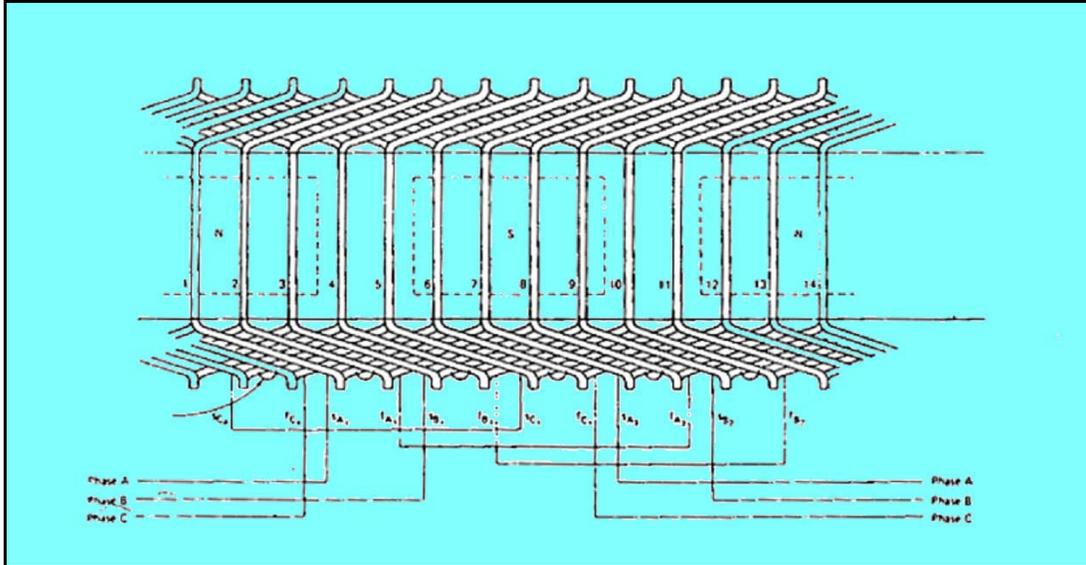
$$E_B = E_B \angle -120^0 \text{ Volt}$$

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



Gambar 5.121 Urutan Fasa ABC

## ❖ Belitan Berlapis Ganda



Gambar 5.122 Belitan Berlapis Ganda Generator Sinkron Tiga Fasa

Kumparan jangkar yang diperlihatkan pada gambar 5.120 hanya mempunyai satu lilitan per kutub per fasa, 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 fasa akan sama untuk menghasilkan tegangan per penghantar dan jumlah total dari penghantar per fasa.

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 fasa. Gambar 5.122 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 tegangan dalam winding overhang.

## ❖ Faktor Distribusi

Seperti telah dijelaskan diatas bahwa sebuah kumparan terdiri dari sejumlah lilitan yang ditempatkan dalam alur secara terpisah. Sehingga, ggl pada terminal menjadi lebih kecil bila dibandingkan dengan kumparan yang telah dipusatkan. Suatu faktor yang harus dikalikan dengan ggl dari sebuah kumparan distribusi untuk menghasilkan total ggl yang dibangkitkan disebut **faktor distribusi  $K_d$**  untuk kumparan. Faktor ini selalu lebih kecil dari satu.

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

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

dimana  $m$  menyatakan jumlah fasa.

Perhatikan gambar 5.123, disini diperlihatkan ggl yang diinduksikan dalam alur 2 akan tertinggal (lagging) dari ggl yang dibangkitkan dalam alur 1 sebesar  $\psi = 15$  derajat listrik, de mikian 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 fasa E adalah jumlah dari seluruh vektor.

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

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 5.124.

### ❖ Faktor Kisar

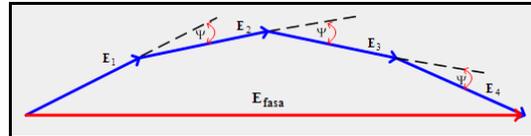
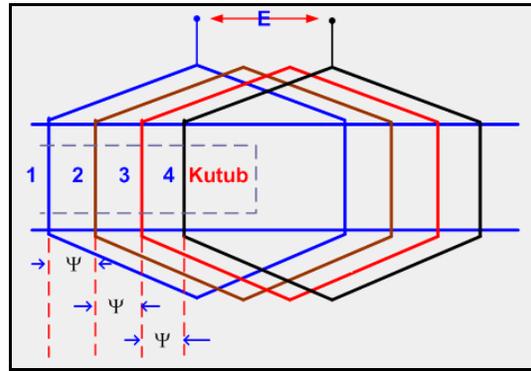
Gambar 5.125, memperlihatkan bentuk kisar dari sebuah kumparan, bila sisi lilitan diletakkan dalam alur 1 dan 7 disebut kisar penuh, sedangkan bila diletakkan dalam alur 1 dan 6 disebut kisar pendek, karena ini sama dengan 5/6 kisar kutub.

Kisar :

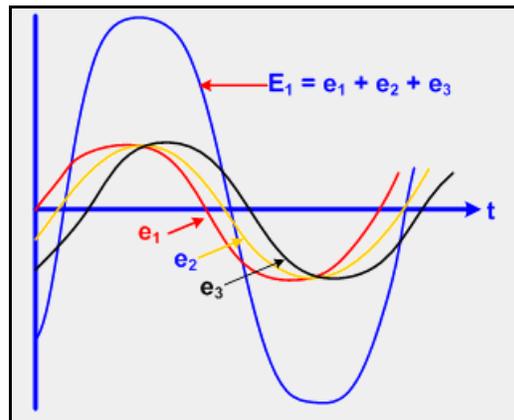
$$5/6 = 5/6 \times 180 \text{ derajat} = 150 \text{ derajat}$$

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

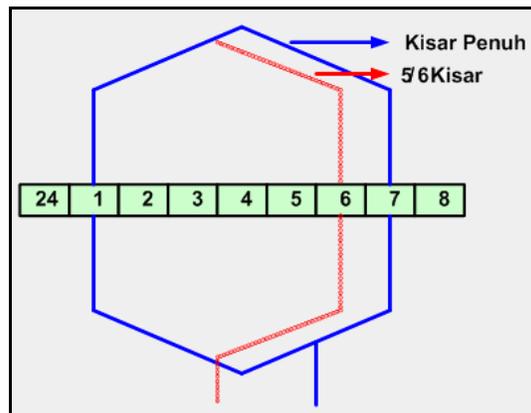
Kisar pendek sering digunakan, karena mempunyai beberapa keuntungan, diantaranya :



Gambar 5.123 Diagram Phasor dari Tegangan Induksi Lilitan



Gambar 5.124 Total Ggl Et dari Tiga Ggl Sinusoidal



Gambar 5.125 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 5.126).

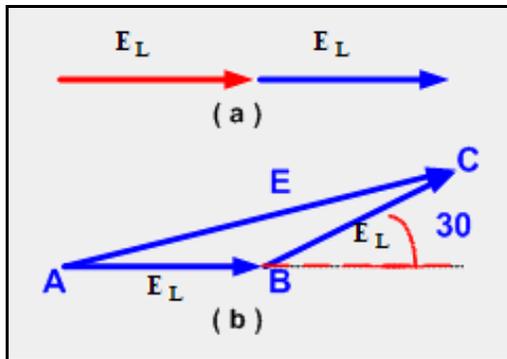
Sedangkan kisar pendek dengan sudut 30 derajat listrik, seperti diperlihatkan pada gambar 5.126 b, maka tegangan resultannya adalah :

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

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

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

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



Gambar 5.126 Vektor Tegangan Lilitan

### ❖ Gaya Gerak Listrik Kumparan

Pada Sub bab sebelumnya telah dibahas mengenai frekuensi dan besarnya tegangan masing-masing fasa 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/fasa =  $2 T$

$T$  = Jumlah lilitan per fasa

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

Ggl induksi rata-rata per penghantar :

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

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

sehingga Ggl induksi rata-rata per penghantar menjadi :

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

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

$$\begin{aligned} &= 2 \cdot f \cdot \phi \cdot Z \text{ Volt} \\ &= 2 \cdot f \cdot \phi \cdot (2T) = 4 \cdot f \cdot \phi \cdot T \text{ volt} \end{aligned}$$

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

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

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

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

### 5.7.3 Prinsip Kerja

Kecepatan rotor dan frekuensi dari tegangan yang dibangkitkan berbanding secara langsung. Gambar 5.127 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 fasa 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 (r/m), frekuensi 1 Hz, untuk frekuensi  $f = 60 \text{ Hz}$ , maka rotor harus berputar 3600 r/m.

Untuk kecepatan rotor  $n \text{ r/m}$ , rotor harus berputar pada kecepatan  $n/60 \text{ revolution per detik (r/s)}$ . 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,

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

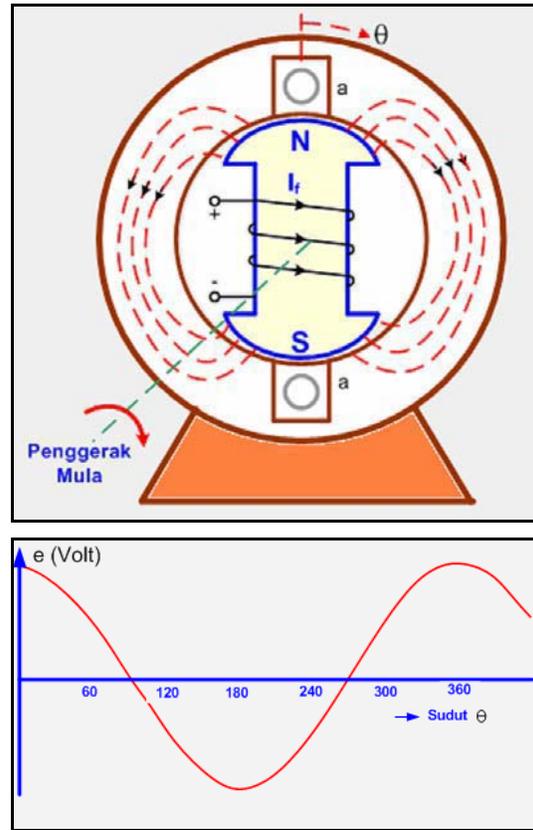
Untuk generator sinkron tiga fasa, harus ada tiga belitan yang masing-masing terpisah sebesar 120 derajat listrik dalam ruang sekitar keliling celah udara seperti diperlihatkan pada kumparan  $a - a'$ ,  $b - b'$  dan  $c - c'$  pada gambar 5.126.

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 5.127  
Diagram Generator AC Satu Fasa Dua Kutub

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

Dengan memakai transformasi trigonometri dari :  $\sin \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} \sin (\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \sin (\alpha - \beta)$ , 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 fasa adalah :

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

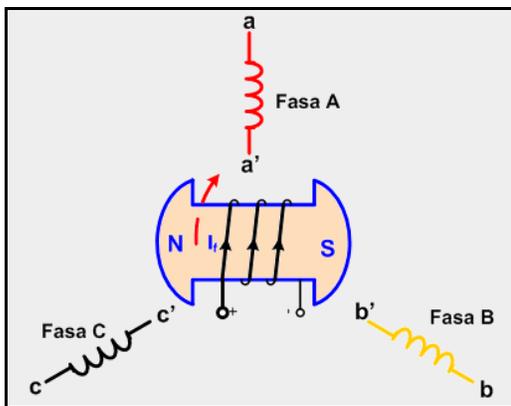
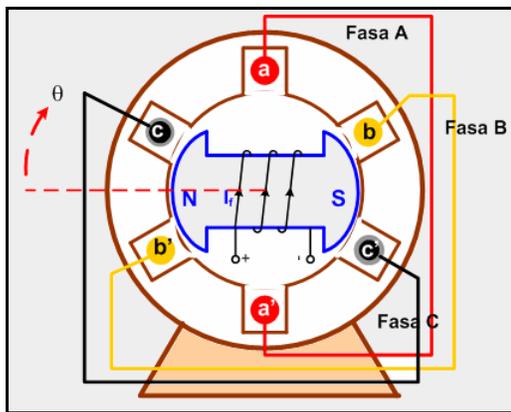
dimana :

$B_m$  = Kerapatan Flux maximum yang dihasilkan 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 5.128 Diagram Generator AC Tiga Fasa Dua Kutub

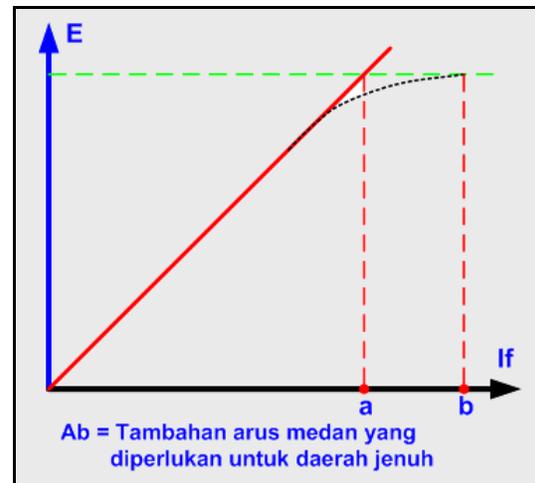
## 5.7.4 Alternator Tanpa Beban

Apabila sebuah mesin sinkron difungsikan sebagai alternator 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 :

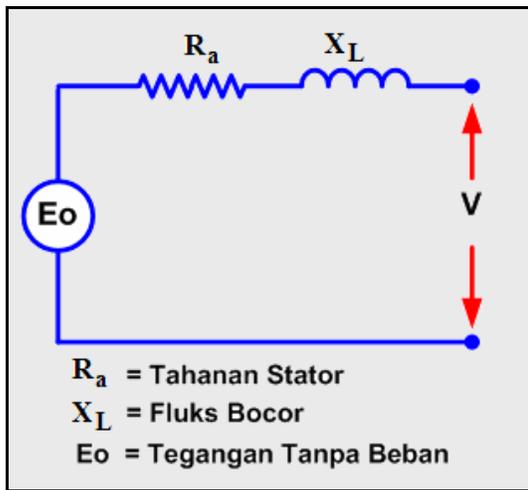
$$E_o = 4,44 \cdot K_d \cdot K_p \cdot f \cdot \phi_m \cdot T \quad \text{Volt}$$

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 5.129.

Kondisi Alternator tanpa beban bisa digambarkan rangkaian ekuivalennya seperti diperlihatkan pada gambar 5.129 b.



(a)



(b)

Gambar 5.129 Kurva dan Rangkaian Ekuivalen Alternator Tanpa Beban

### 5.7.5 Alternator Berbeban

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

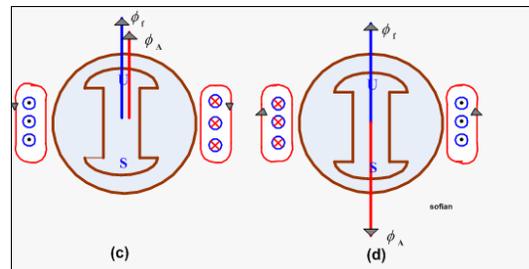
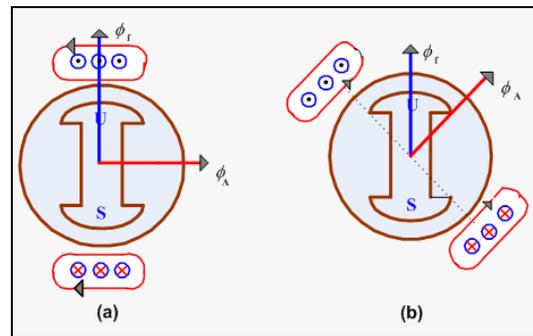
- Resistansi jangkar  $R_a$
- Reaktansi bocor jangkar  $X_L$
- Reaksi Jangkar  $X_a$

#### a. Resistansi Jangkar

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

#### b. Reaktansi Bocor Jangkar

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



Gambar 5.130 Kondisi Reaksi Jangkar

#### c. Reaksi Jangkar

Adanya arus yang mengalir pada kumparan jangkar saat Alternator dibebani 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 5.130. yang mengilustrasikan kondisi reaksi jangkar untuk jenis beban yang berbeda-beda.

**Gambar a**, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat alternator dibebani tahanan (resistif) sehingga arus jangkar la sefasa dengan Ggl  $E_b$  dan  $\phi_A$  akan tegak lurus terhadap  $\phi_F$ .

**Gambar b**, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat alternator dibebani kapasitif, sehingga arus jangkar  $I_a$  mendahului  $E_b$  sebesar  $\theta$  dan  $\phi_A$  terbelakang terhadap  $\phi_F$  dengan sudut  $(90 - \theta)$ .

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

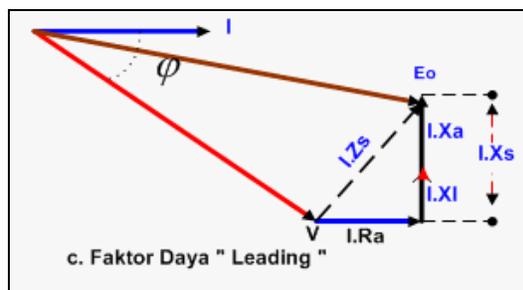
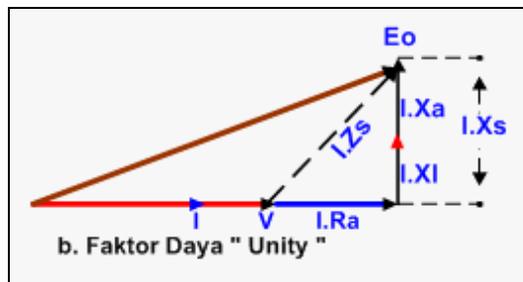
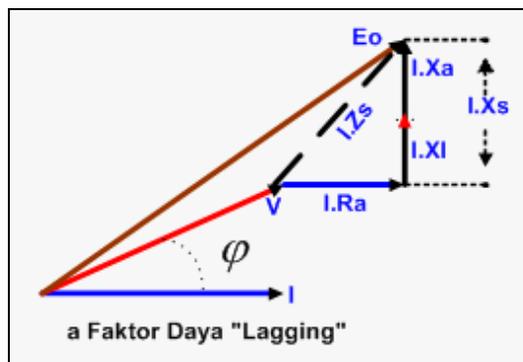
**Gambar d**, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat arus diberi beban induktif murni sehingga mengakibatkan arus jangkar  $I_a$  terbelakang dari  $E_b$  sebesar  $90^\circ$  dan  $\phi_A$  akan memperlemah  $\phi_F$  yang berpengaruh terhadap pemagnetan.

**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 diperlihatkan pada gambar 5.131.

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

$$\begin{aligned} \text{Total Tegangan Jatuh pada Beban :} \\ &= I R_a + j(I X_a + I X_L) \\ &= I \{ R_a + j(X_a + X_L) \} \\ &= I \{ R_a + j(X_s) \} = I Z_s \end{aligned}$$



Gambar 5.131 Vektor Diagram dari Beban Alternator

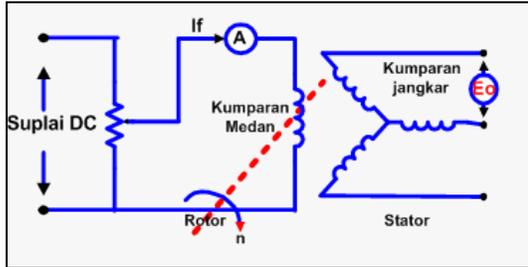
## 5.7.6 Menentukan Resistansi dan Reaktansi

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

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

### ➤ Test Tanpa Beban

Test Tanpa Beban dilakukan pada kecepatan sinkron dengan rangkaian jangkar terbuka (tanpa beban) seperti diperlihatkan pada gambar 5.132 percobaan dilakukan dengan cara mengatur arus medan ( $I_f$ ) dari nol sampai rating tegangan output terminal tercapai.



Gambar 5.132 Rangkaian Test Alternator Tanpa Beban

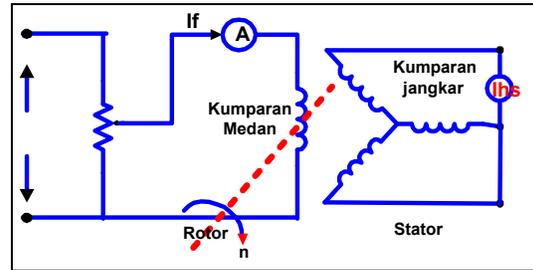
### ➤ Test Hubung Singkat

Untuk melakukan test ini terminal alternator dihubungkan singkat dengan Amperemeter diletakkan diantara dua penghantar yang dihubungkan singkat tersebut (lihat Gambar 5.133). Arus medan dinaikkan secara bertahap sampai diperoleh arus jangkar maksimum. Selama proses test arus  $I_f$  dan arus hubung singkat  $I_{hs}$  dicatat.

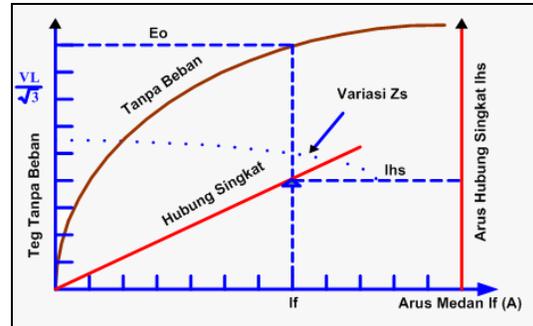
Dari hasil kedua test diatas, maka dapat digambar bentuk karakteristik seperti diperlihatkan pada gambar 5.133.

Impedansi sinkron dicari berdasarkan hasil test, adalah :

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



Gambar 5.133 Rangkaian Test Alternator di Hubung Singkat



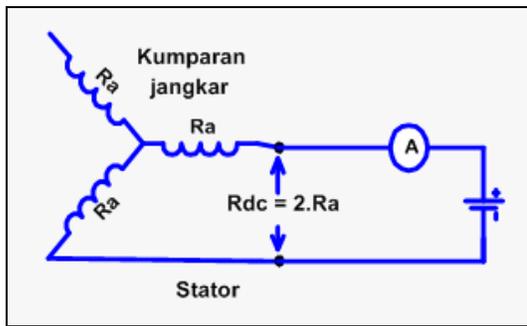
Gambar 5.134 Karakteristik Tanpa Beban dan Hubung Singkat sebuah Alternator

### ➤ Test Resistansi

Dengan rangkaian medan terbuka, resistansi DC diukur antara dua terminal output sehingga dua fasa terhubung secara seri (Gambar 5.135). Resistansi per fasa 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 5.135 Pengukuran Resistansi DC

### 5.7.7 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 besarnya arus jangkar ( $I_a$ ) yang mengalir.

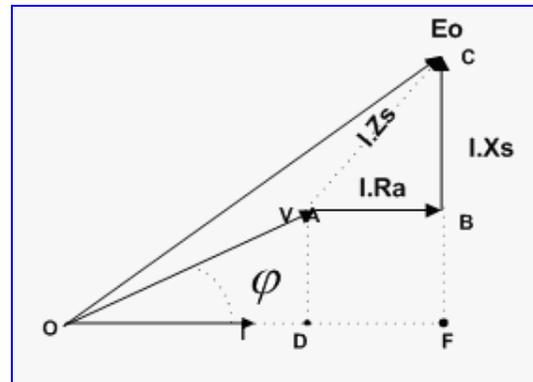
Untuk menentukan pengaturan tegangan dari alternator adalah dengan memanfaatkan karakteristik tanpa beban dan hubung singkat yang diperoleh dari hasil percobaan dan pengukuran tahanan jangkar. Ada tiga metoda atau cara yang sering digunakan untuk menentukan pengaturan tegangan tersebut, yaitu :

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

#### ◆ 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 5.136 Vektor Diagram Pf "Lagging"

Gambar 5.137 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 Sinkron.

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

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

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.

◆ **Metoda Amper Lilit**

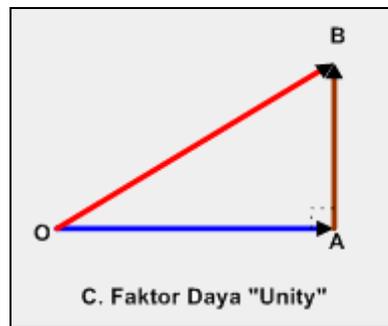
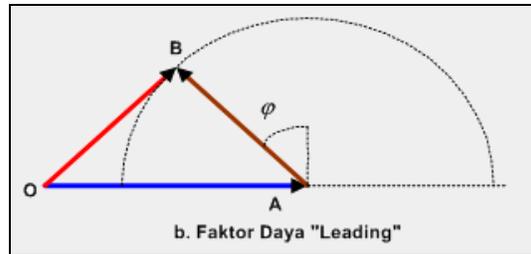
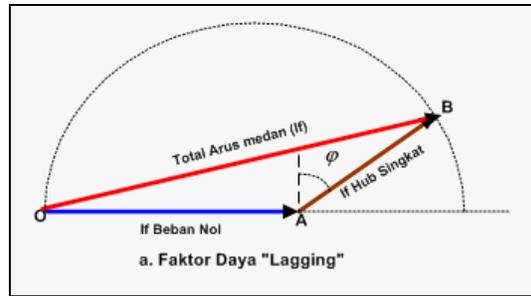
Perhitungan dengan Metoda Amper Lilit ber-dasarkan data yang diperoleh dari perco-baan tanpa beban dan hubung singkat. Dengan metoda ini reaktansi bocor XI diabaikan dan reaksi jangkar diperhitungkan. Adapun langkah-langkah menentukan nilai arus medan yang diperlukan untuk memperoleh tegangan terminal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

- Tentukan nilai arus medan (Vektor OA) dari percobaan beban nol yang diperlukan untuk mendapatkan tegangan nominal alternator.
  - Tentukan nilai arus medan (Vektor AB) dari percobaan hubung singkat yang diperlukan untuk mendapatkan arus beban penuh alternator.
  - Gambarkan diagram vektornya dengan memperhatikan faktor dayanya:
    - ✓ untuk faktor daya "Lagging" dengan sudut  $(90^0 + \phi)$
    - ✓ untuk faktor daya "Leading" dengan sudut  $(90^0 - \phi)$
    - ✓ untuk faktor daya "Unity" dengan sudut  $(90^0)$
- (perhatikan Gambar 5.137 a, b, dan c)
- Hitung nilai arus medan total yang ditunjukkan oleh vektor OB.

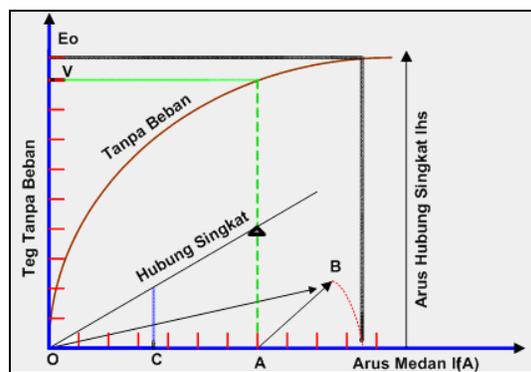
Gambar 5.138 memperlihatkan diagram secara lengkap dengan karakteristik beban nol dan hubung singkat.

OA = Arus medan yang diperlukan untuk mendapatkan tegangan nominal.  
 OC = Arus medan yang diperlukan untuk mendapatkan arus beban penuh pada hu- bung singkat.

AB = OC = dengan sudut  $(90^0 + \phi)$  terhadap OA.



Gambar 5.137 Vektor Arus Medan



Gambar 5.138 Karakteristik Beban Nol, Hubung Singkat, dan Vektor Arus Medan

OB = Total arus medan yang dibutuhkan untuk mendapatkan tegangan  $E_o$  dari karakteristik beban nol.

$$OB = \sqrt{OA^2 + AB^2 + 2xOAxABx\cos\{180 - (90^0 + \varphi)\}}$$

#### ◆ Metoda Potier

Metoda ini berdasarkan pada pemisahan kerugian akibat reaktansi bocor  $X_l$  dan pengaruh reaksi jangkar  $X_a$ . Data yang diperlukan adalah :

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

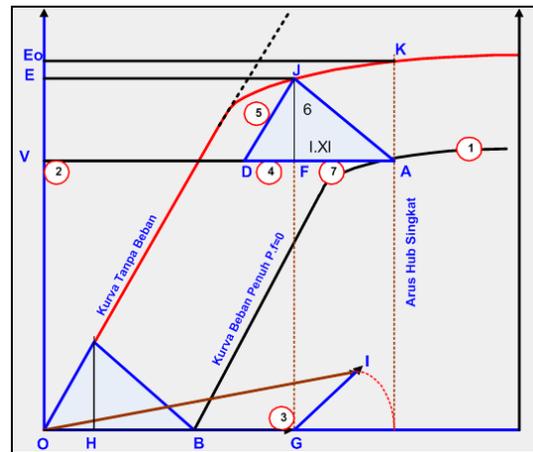
Khusus untuk karakteristik beban penuh dengan faktor daya nol dapat diperoleh dengan cara melakukan percobaan terhadap alternator seperti halnya pada saat percobaan tanpa beban, yaitu menaikkan arus medan secara bertahap, yang membedakannya supaya menghasilkan faktor daya nol, maka alternator harus diberi beban reaktor murni. Arus jangkar dan faktor daya nol saat dibebani 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
2. Gambarkan garis sejajar melalui kurva beban nol. Buat titik **A** yang menunjukkan nilai arus medan pada percobaan faktor daya nol pada saat tegangan nominal.
3. Buat titik **B**, berdasarkan percobaan hubung singkat dengan arus jangkar penuh. **OB** menunjukkan nilai arus medan pada saat percobaan tersebut.
4. Tarik garis **AD** yang sama dan sejajar garis **OB**.
5. Melalui titik **D** tarik garis sejajar kurva senjang udara sampai memo-

tong kurva beban nol dititik **J**. **Segitiga ADJ** disebut **segitiga Potier**.

6. Gambar garis **JF** tegak lurus **AD**. Panjang **JF** menunjukkan kerugian tegangan akibat reaktansi bocor.
7. **AF** menunjukkan besarnya arus medan yang dibutuhkan untuk mengatasi efek magnetisasi akibat reaksi jangkar saat beban penuh.
8. **DF** untuk menyeimbangkan reaktansi bocor jangkar (**JF**)



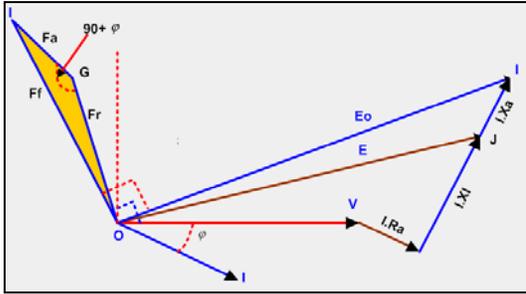
Gambar 5.139 Diagram Potier

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 E<sub>o</sub>** bisa diketahui.

Vektor diagram yang terlihat pada diagram potier bisa digambarkan secara terpisah seperti terlihat pada gambar 5.140.

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



Gambar 5.140 Vektor Diagram Potier

## 5.7.8 Kerja Paralel Alternator

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

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

### ♦ Cara Memparalelkan Alternator

Syarat-syarat yang harus dipenuhi untuk memparalelkan dua buah alternator atau lebih ialah :

- Polaritas dari alternator harus sama dan bertentangan setiap saat terhadap satu sama lainnya.
- Nilai efektif arus bolak-balik dari tegangan harus sama.
- Tegangan Alternator(mesin) yang diparalelkan mempunyai bentuk gelombang yang sama.

- Frekuensi kedua alternator atau frekuensi alternator dengan jala-jala harus sama.
- Urutan fasa dari kedua alternator harus sama.

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

- Lampu Cahaya berputar dan Voltmeter
- Voltmeter, Frekuensi Meter, dan Syn-chroscope.
- Cara Otomatis

### ♦ Lampu Cahaya Berputar dan Voltmeter

Buat rangkaian seperti diperlihatkan pada Gambar 5.141, pilih lampu dengan tegangan kerja dua kali tegangan fasa netral alternator atau gunakan dua lampu yang dihubungkan secara seri. Dalam keadaan saklar S terbuka operasikan alternator, kemudian lihat urutan nyala lampu. Urutan lampu akan berubah menurut urutan L1 - L2 - L3 - L1 - L2 - L3.

Perhatikan Gambar 5.142 a, pada keadaan ini L1 paling terang, L2 terang, dan L3 redup.

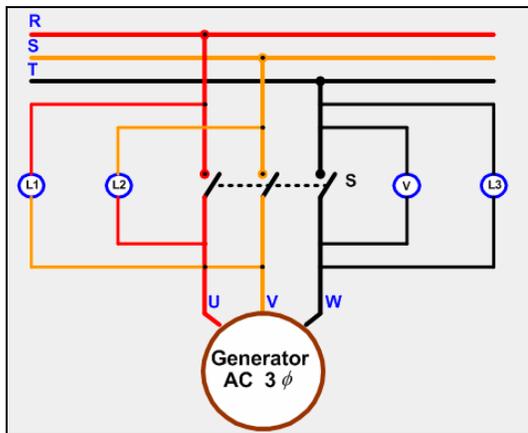
Perhatikan Gambar 5.142 b, pada keadaan ini:

- L2 paling terang
- L1 terang
- L3 terang

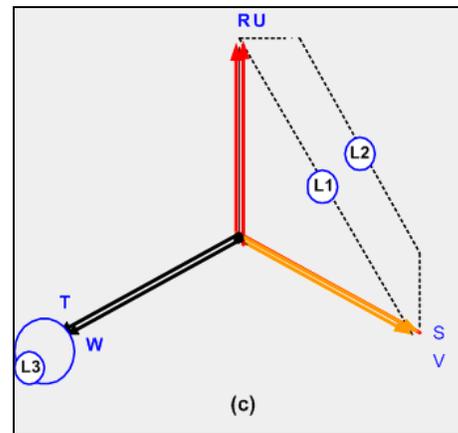
Perhatikan gambar 5.142 c, pada keadaan ini,

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

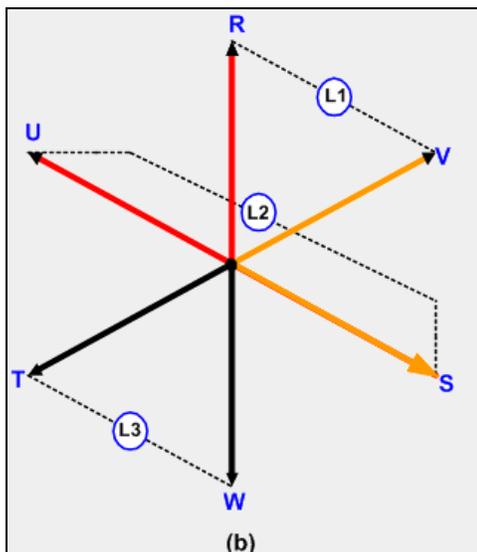
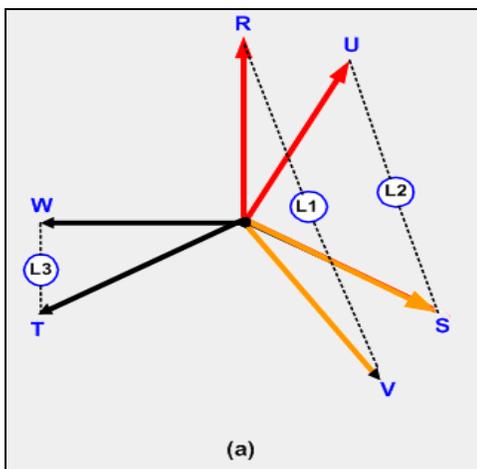
Pada saat kondisi ini maka alternator dapat diparalelkan dengan jala-jala (alternator lain).



Gambar 5.141 Rangkaian Paralel Alternator



Gambar 5.142 Rangkaian Lampu Berputar



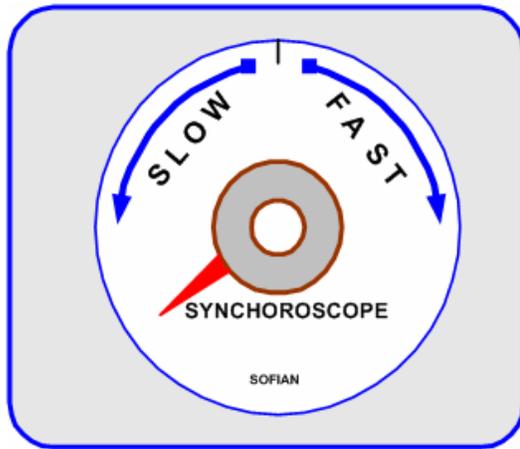
#### ♦ Voltmeter, Frekuensi Meter dan Synchroscope

Pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik, untuk indikator paralel alternator banyak yang menggunakan alat **Synchroscope**. 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 berputar berlawanan arah jarum jam berarti frekuensi alternator lebih rendah dan bila searah jarum jam berarti frekuensi alternator lebih tinggi. Pada saat jarum telah diam dan menunjuk pada kedudukan vertikal, berarti beda fasa alternator 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.

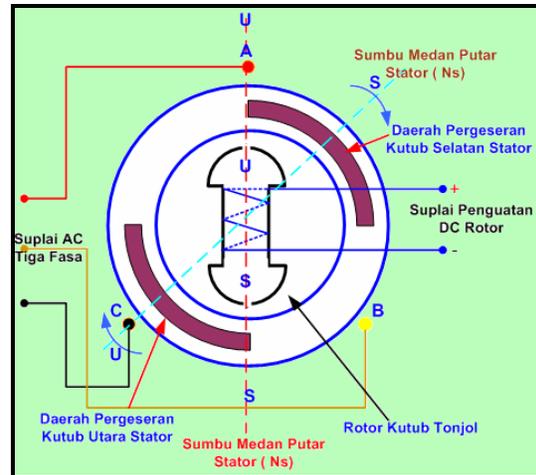
#### ♦ Cara Otomatis

Paralel alternator secara otomatis biasanya menggunakan alat yang secara



Gambar 5. 143 Sychroscope

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 5.144 Motor Sinkron dua Kutub

Gambar 5.144 mengilustrasikan sebuah motor sinkron dua kutub dengan asumsi rotor dalam keadaan diam.

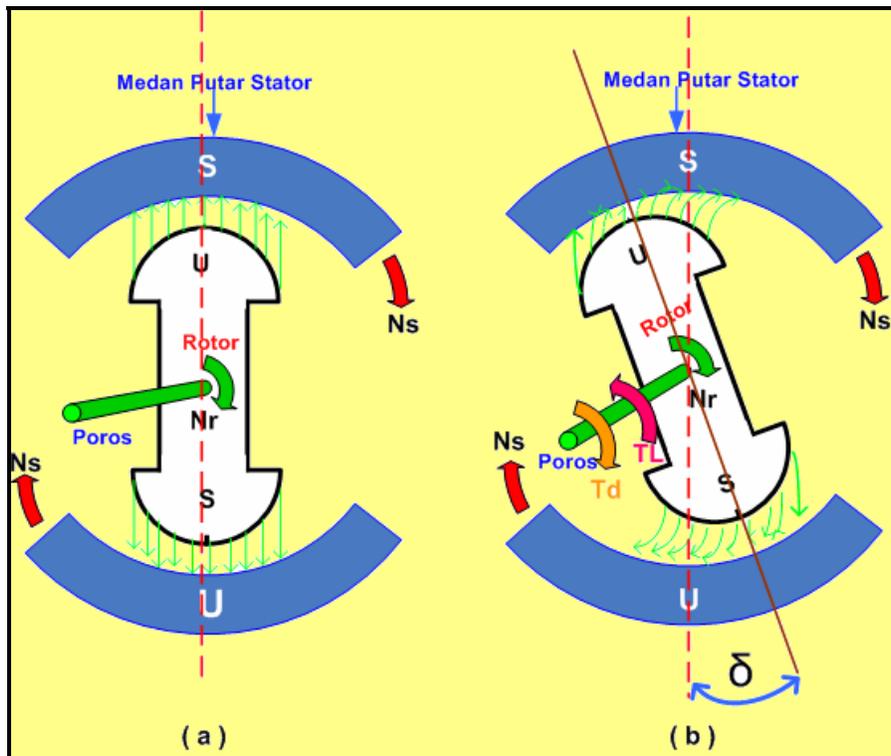
## 5.8 Motor Sinkron

### 5.8.1 Prinsip Kerja

Motor sinkron bekerja dengan dua sumber arus, yaitu arus bolak-balik (AC) dan sumber arus searah (DC). Motor akan berputar sinkron bila putaran medan putar sama dengan putaran rotor. Jadi bila stator dihubungkan dengan sumber tegangan tiga fasa (AC), maka pada stator akan terjadi medan putar dan pada rotor dimasukan tegangan DC.

Sumber DC baru dimasukkan setelah rotor berputar dengan putaran sinkron, karena motor sinkron akan bekerja bila  $N_s = N_r$ , bila hal ini belum tercapai, maka motor tidak akan bekerja.

Saat poros motor tidak berbeban, maka poros rotor “dikunci” oleh kutub stator lawan dan motor akan berputar pada kecepatan sinkron dan sudut Torsi  $\delta$  akan nol (Gambar 5.145 a). Bila beban mekanis diberikan pada poros rotor, maka putaran rotor cenderung menurun (Gambar 5.145 b) tetapi putaran masih sinkron. Ikatan magnetik antara medan rotor dan stator masih terjadi, tetapi rotor tertinggal oleh sudut Torsi  $\delta$ . Torsi yang dihasilkan  $T_d$  yang tergantung pada sudut  $\delta$  dan ini harus cukup untuk mengatasi Torsi poros ( $T_{beban}$ ) yang terjadi.

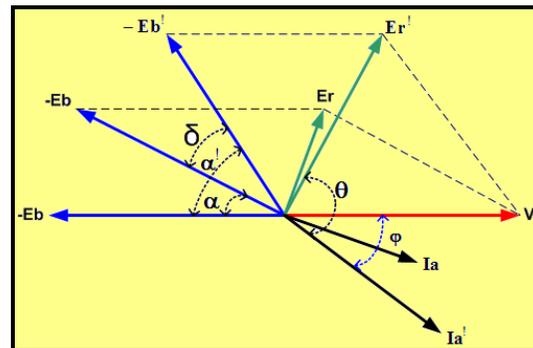


Gambar 5.145 Pengaruh Beban pada Kutub Rotor Motor Sinkron

### 5.8.2 Motor Saat Berbeban

Seperti halnya pada jenis motor yang lain, pada motor sinkronpun akan terjadi ggl lawan, akibat naiknya arus yang mengalir pada jangkar sebagai kompensasi dari kenaikan Torsi dan Daya oleh beban.

Sebagai ilustrasi diperlihatkan pada gambar 5.146. Apabila ada kenaikan beban pada poros motor, kecepatan rotor akan menurun sesaat karena diperlukan waktu untuk motor menyerap tambahan daya dari jala-jala. Meskipun masih berputar pada kecepatan sinkron, rotor tetap akan tertinggal sebesar sudut Torsi  $\delta$  dari medan stator. Ggl yang akan diinduksikan pada posisi rotor yang baru dan mengenai medan stator adalah  $E_b'$ .



Gambar 5.146 Pengaruh Kenaikan Beban Pada Arus Jangkar

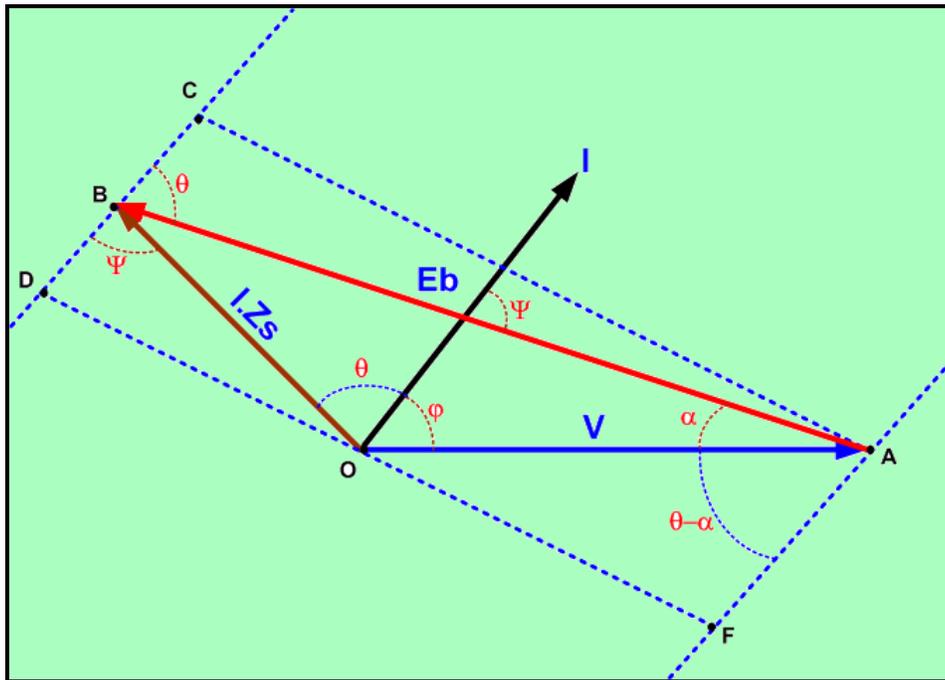
Saat tanpa beban (beban ringan)  $E_b$  dan  $V$  hampir berlawanan secara langsung, tetapi saat beban bertambah

kutub rotor tertinggal sebesar sudut Torsi  $\delta$ . Seperti diperlihatkan pada gambar 5.146.  $E_b$  saat berbeban bergeser sebesar Torsi  $\delta$  dari posisi  $E_b$  tanpa beban. Tegangan  $E_r$  tergantung pada posisi  $E_b$ , dan nilai arus jangkar adalah :

$$I_2 = \frac{V_4(-E_b)}{Z_s} \dots\dots\dots(5.8-1)$$

Motor akan menyerap daya dari jala-jala untuk mengkompensasi kenaikan beban poros, tanpa mengakibatkan perubahan pada kecepatan rata-ratanya. Tetapi bila beban bertambah terus, bisa Mengakibatkan motor keluar dari keadaan sinkron dan berhenti berputar.

### 5.8.3 Daya Dihasilkan Motor Sinkron



Gambar 5.147 Vektor Diagram untuk Menentukan Daya Motor

Gambar 5.147 memperlihatkan vektor diagram sebuah motor sinkron dengan faktor daya "leading", dimana :

- OA = Tegangan suplai/fasa
- AB = Ggl lawan dengan sudut beban  $\alpha$
- OB = Tegangan resultan  $E_r = I \cdot Z_s$
- $\theta$  = Sudut antara I dengan  $E_b$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_a}$$

- Garis CD dibuat dengan beda sudut  $\theta$  dari AB
  - AC dan FD tegak lurus CD
- Daya mekanik per fasa yang terjadi pada rotor :

$$P_m = E_b \cdot I \cdot \cos \psi \text{ Watt} \dots\dots\dots(5.8-2)$$

pada  $\Delta OBD \Rightarrow BD = I \cdot Z_s \cdot \cos \psi$   
 $BD = CD - BC$  atau  $BD = AE - BC$

$$I \cdot Z_s \cdot \cos \psi = V \cdot \cos (\theta - \alpha) - E_b \cdot \cos \theta$$

$$\therefore I \cdot \cos \psi = \frac{V}{Z_s} \cos (\theta - \alpha) - \frac{E_b}{Z_s} \cos \theta \quad (5.8-3)$$

Substitusikan pers (5.8-3) ke pers(5.8-2)

$$P_m / \text{fasa} = E_b \left[ \frac{V}{Z_s} \cos (\theta - \alpha) - \frac{E_b}{Z_s} \cos \theta \right]$$

$$= \frac{E_b \cdot V}{Z_s} \cos (\theta - \alpha) - \frac{E_b^2}{Z_s} \cos \theta \dots\dots\dots (5.8-4)$$

Untuk menentukan nilai daya maksimum yang dihasilkan motor dapat diperoleh dengan mendefereensialkan pers(3-6) terhadap sudut beban.

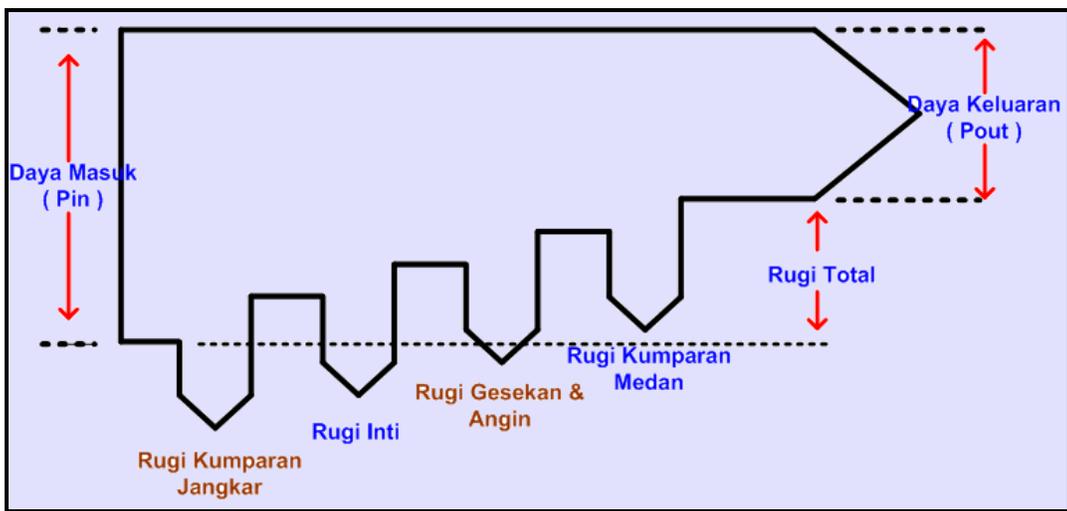
$$\therefore \frac{dP_m}{d\alpha} = -\frac{E_b \cdot V}{Z_s} \sin (\theta - \alpha) \text{ atau } \sin (\theta - \alpha) = 0 \Rightarrow \theta = \alpha$$

\therefore Nilai daya Maksimum

$$P_{m(\max)} = \frac{E_b \cdot V}{Z_s} - \frac{E_b^2}{Z_s} \cos \alpha$$

$$P_{m(\max)} = \frac{E_b \cdot V}{Z_s} - \frac{E_b^2}{Z_s} \cos \alpha \dots\dots\dots (5.8-5)$$

### 5.8.4 Efisiensi Motor Sinkron



Gambar 5.148 Diagram Aliran Daya pada Sebuah Motor Sinkron

Adanya kerugian-kerugian yang terjadi pada motor mengurangi daya masuk listrik (Pin), semakin kecil kerugian yang terjadi maka semakin tinggi efisiensi motor.

Adapun kerugian-kerugian yang terjadi pada sebuah motor listrik bisa diilustrasikan seperti pada gambar 5.148.

$$\text{Efisiensi } \eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum Rugi} \times 100\% \dots\dots\dots(5.8-6)$$

$$P_{out} = \omega.T_{poros} \dots\dots\dots(5.8-7)$$

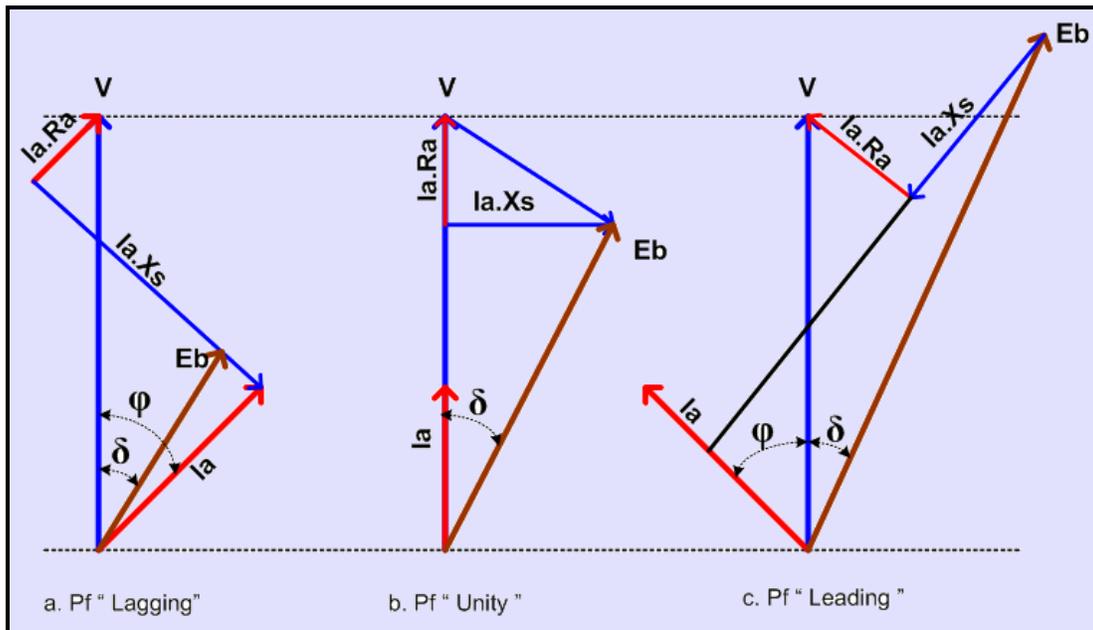
$$P_{in} = \sqrt{3}.VL.IL.Cos\phi \dots\dots\dots (5.8-8)$$

Sehingga persamaan untuk efisiensi dapat ditulis seperti persamaan (5.8-9),

$$\eta = \frac{\omega.T_{poros}}{\omega.T_{poros} + 3.Ia^2.Ra + If.Vf + P_{inti} + P_{su}} \times 100\% \dots\dots\dots(5.8-9)$$

### 5.8.5 Kurva V Motor Sinkron

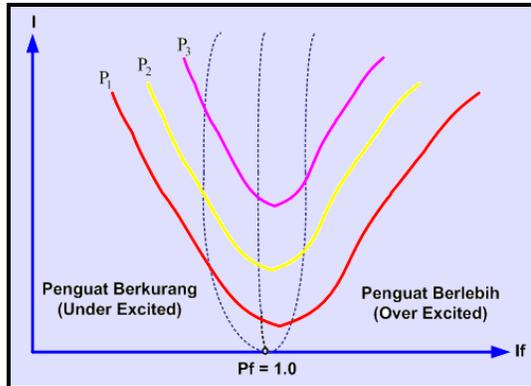
Gambar 5.149, memperlihatkan diagram vektor sebuah motor sinkron dengan faktor daya yang berbeda-beda pada keadaan beban tetap.



Gambar 5.149 Diagram Vektor dalam Keadaan Beban Tetap, dengan Faktor Daya Berbeda

Arus Ia yang disuplai dari jala-jala untuk motor sinkron nilainya akan besar saat faktor daya "lagging" (penguatan kurang), kemudian menurun pada saat faktor daya

“Unity” dan naik kembali pada saat faktor daya ‘leading’ (penguat lebih). Sehingga kita bisa menggambarkan hubungan arus jangkar  $I_a$  dengan arus medan  $I_f$  untuk suatu beban yang tetap, dan perubahan ini dapat digambarkan dalam bentuk kurva V, seperti diperlihatkan pada gambar 5.150.



Gambar 5.150 Kurva V Motor Sinkron

Pada saat motor sinkron dalam kondisi tidak berbeban diberi penguatan berlebih (over excited) akan berfungsi sebagai kapasitor, sehingga mempunyai kemampuan untuk memperbaiki faktor daya jaringan listrik dimana motor tersebut terhubung. Hal ini terjadi karena daya reaktif yang dihasilkan motor akan mengkompensasi kelebihan fluk pada jaringan listrik.

Motor sinkron yang dimanfaatkan untuk memperbaiki faktor daya biasa disebut kondensor sinkron atau kapasitor sinkron.

### 5.8.6 Pengasutan Motor Sinkron

Langkah pengasutan sebuah motor sinkron supaya berputar pada kecepatan sinkronnya tidak semudah seperti kita melakukan pengasutan pada sebuah motor induksi.

Rotor sebuah mesin sinkron seperti telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya terdiri dari kumparan yang bila

diberi arus searah melalui *slipring* maka akan timbul kutub utara dan selatan pada sepatu kutub dimana kumparan itu diletakkan. Nilai arus yang diberikan juga bisa diatur sehingga memungkinkan faktor daya motor sinkron pada kondisi *leading* atau *lagging*.

Salah satu cara untuk pengasutan motor dengan jenis rotor seperti dijelaskan di atas adalah dengan cara mengfungsikan mesin sinkron sebagai generator sinkron dengan proses sinkronisasi seperti telah dijelaskan pada sub bab 5.7.8. Apabila proses sinkronisasi generator dengan jala-jala telah selesai dilakukan, selanjutnya putuskan hubungan tegangan ke penggerak mula. Proses ini akan menyebabkan aliran daya ke mesin sinkron akan berubah, yang mengakibatkan mesin sinkron berubah fungsi dari generator sinkron menjadi motor sinkron.

Prosedur pengasutan seperti dijelaskan di atas biasanya dilakukan di laboratorium mesin listrik atau saat motor tidak terhubung langsung ke beban.

Untuk mengatasi kesulitan dalam proses pengasutan ini, kebanyakan motor sinkron untuk digunakan industri telah dirancang secara khusus dengan dilengkapi kumparan peredam (*damper winding*) yang diletakkan pada sepatu kutub dan kumparan peredam ini dihubungkan singkat pada kedua ujungnya.

Pada saat periode pengasutan motor sinkron difungsikan seperti sebuah motor induksi sampai putaran rotornya mendekati kecepatan medan putar (kecepatan sinkron).

Berikut ini adalah langkah untuk pengasutan motor sinkron yang dilengkapi dengan kumparan peredam :

- 1) Putuskan suplai arus searah ke kumparan medan motor sinkron, kemudian hubung singkat terminal kumparan medan;
- 2) Naikkan tegangan suplai tiga fasa ke terminal stator motor secara bertahap dengan menggunakan auto-transformator dan amati putaran rotor sampai mendekati kecepatan sinkronnya;
- 3) Bila putaran rotor sudah mendekati kecepatan sinkronnya, lepaskan rangkaian hubung singkat pada kumparan medannya. Kemudian masukan suplai arus medan (*dc excitation*) secara bertahap sampai putaran rotor motor akan masuk pada kondisi putaran sinkron;
- 4) Berikan tegangan suplai ke terminal stator secara penuh (tanpa melewati autotransformator);
- 5) Atur nilai arus ke kumparan medan untuk memperoleh faktor daya yang dibutuhkan.

## 5.9 Motor Satu Fasa

### 5.9.1 Pendahuluan

Motor satu fasa umumnya dibuat dengan daya yang kecil (*fractional horse power*), konstruksinya juga relatif sederhana, walaupun demikian motor jenis ini tidak terlalu mudah untuk dianalisa. Motor satu fasa banyak digunakan pada peralatan rumah tangga dan industri, seperti refrigerator, pompa air, mesin cu-ci, mesin jahit, dan lain-lain.

Motor satu fasa dibagi atas tiga tipe, yaitu :

#### 1. Motor Induksi Satu Fasa

Motor jenis ini diklasifikasikan berdasarkan metoda yang digunakan untuk pengasutannya dan mengacu pada nama metoda yang digunakannya, seperti *resistance start (split phase)*, *capacitor-start*, *capacitor-run*, dan *shaded pole*.

#### 2. Motor Seri Satu Fasa (Universal)

Motor seri satu fasa dapat digunakan dengan dua macam jenis arus, yaitu arus searah (dc) dan arus bolak-balik (ac). Motor jenis ini mampu memberikan torsi asut yang tinggi dan beroperasi pada kecepatan tinggi. Motor universal banyak digunakan pada peralatan rumah tangga dan peralatan yang bersifat *portable*.

#### 3. Motor Sinkron Satu Fasa

Tipe motor sinkron satu fasa berputar pada kecepatan konstan dan digunakan pada peralatan yang

membutuhkan kecepatan konstan seperti jam. Ada dua tipe motor sinkron yang umum digunakan, yaitu *reluctance motor* dan *hysteresis motor*.

Dibawah ini diperlihatkan beberapa gambar peralatan yang menggunakan motor satu fasa.



Gambar 5.151 Food Processor



Gambar 5.152 Mixer

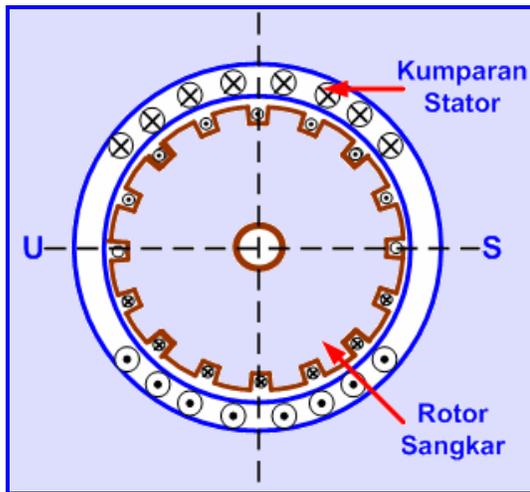


Gambar 5.153 Pod Coffee Makers

## 5.9.2 Motor Induksi Satu Fasa

Konstruksi motor induksi satu fasa hampir sama dengan motor induksi tiga fasa rotor sangkar, yang membedakannya pada kumparan stator yang berupa kumparan satu fasa. Motor induksi satu fasa biasanya dilengkapi saklar sentrifugal yang diperlukan saat pengasutan, saklar akan memutuskan suplai tegangan ke kumparan bantu setelah motor mencapai kecepatan 75% s.d 100% dari kecepatan nominal motor.

Dengan menghubungkan motor induksi satu fasa ke sumber tegangan bolak-balik satu fasa, maka kumparan stator akan menghasilkan fluksi yang berbentuk sinusoidal. Fluks magnet ini hanya merupakan fluks pulsasi, bukan merupakan fluks medan putar, sehingga tidak memutar rotor yang dalam keadaan diam, hanya putaran fluksi yang dihasilkan. Jadi motor induksi satu fasa tidak dapat *start* sendiri. Untuk dapat *start* sendiri, motor memerlukan alat bantu, alat bantu ini ada yang digunakan saat *start* atau selama motor bekerja.

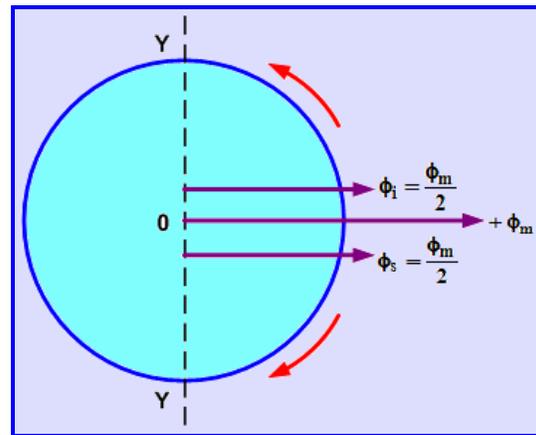


Gambar 5.154 Letak Kumparan Motor Induksi Satu Fasa

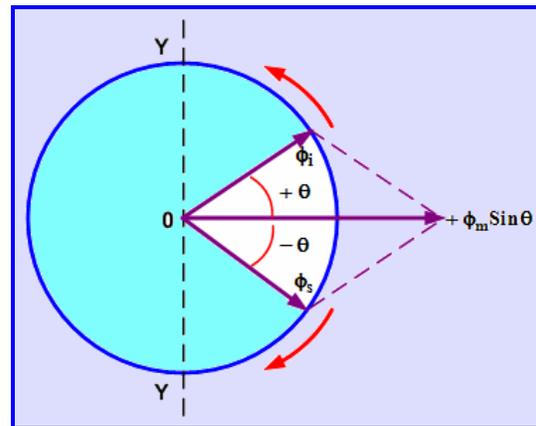
### 5.9.2.1 Teori Medan Putar Ganda

Teori medan putar ganda (double revolving field theory) menganggap bahwa fluksi bolak-balik yang dihasilkan kumparan stator dapat diuraikan dalam dua komponen, yaitu satu komponen sinkron yang berputar dengan arah maju ( $\phi_s$ ) dan satu dengan arah mundur ( $\phi_i$ ) (Gambar 5.155).

Putaran fluks magnet dapat dijelaskan sebagai berikut :



(a)



(b)

1) **Perhatikan gambar 5.155 a :**

Harga fluksi maksimum terdiri dari dua komponen fluksi  $\phi_s$  dan  $\phi_i$ , dimana harga fluksi  $\phi_s$  dan  $\phi_i$  setengah dari harga fluksi maksimum ( $\phi_m$ ). Fluksi  $\phi_s$  berputar kekanan searah jarum jam dan fluksi  $\phi_i$  berputar kekiri berlawanan arah jarum jam

2) **Perhatikan gambar 5.155 b :**

Setelah beberapa waktu fluksi  $\phi_s$  menunjukkan suatu sudut  $-\theta$  dan fluksi  $\phi_i$  menunjukkan sudut  $+\theta$ , maka resultan fluksinya adalah :

$$\phi_r = \frac{\phi_m}{2} \sin \frac{2\theta}{2} = \phi_m \sin \theta$$

3) **Perhatikan gambar 5.155 c :**

Setelah seperempat periode putaran fluksi  $\phi_s$  dan fluksi  $\phi_i$  besarnya sama dan berlawanan arah, sehingga besarnya fluksi resultan  $\phi_r = 0$ .

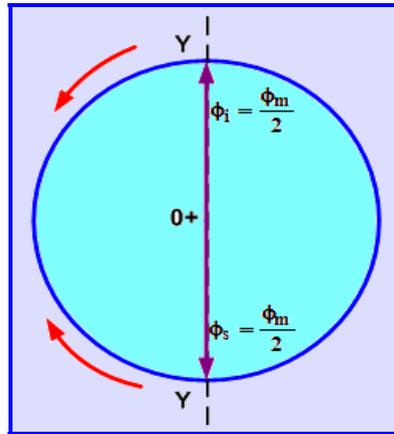
4) **Perhatikan gambar 5.155 d :**

Selanjutnya pada setengah periode putaran fluksi  $\phi_s$  dan  $\phi_i$  searah namun arahnya berlawanan dengan  $\phi_m$ , maka resultan fluksi  $\phi_r$  akan sama dengan  $-\phi_m$ .

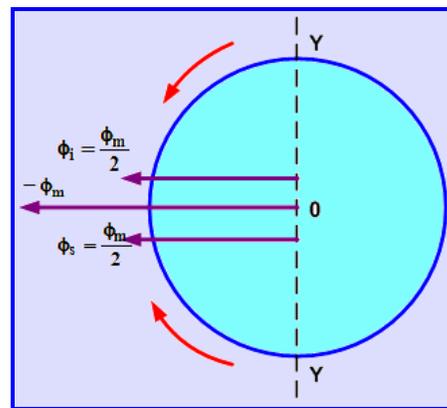
5) **Perhatikan gambar 5.155 e :**

Pada tigaperempat putaran fluksi  $\phi_s$  dan fluksi  $\phi_i$  akan berlawanan arah, maka fluksi resultan  $\phi_r=0$ , dan ini berlangsung secara terus menerus sehingga hasilnya berbentuk gelombang seperti terlihat pada gambar 5.156.

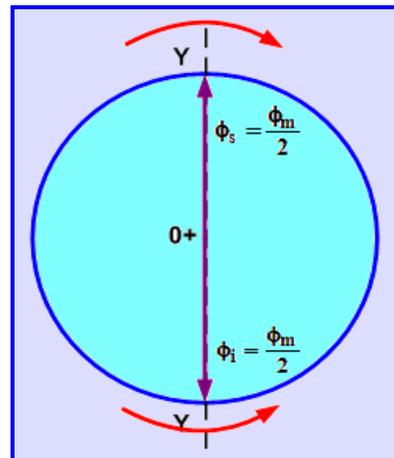
Bentuk gelombang fluksi terdiri dari dua komponen fluksi putaran, dimana masing-masing besarnya setengah fluksi resultan.



(c)

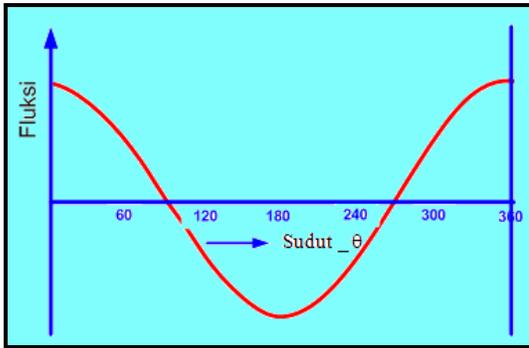


(d)



(e)

Gambar 5.155 Putaran Fluksi



Gambar 5.156 Bentuk Gelombang Fluksi

### 5.9.2.2 Lengkung (Kurva) Torsi

Seperti telah dijelaskan bahwa medan stator pada motor induksi satu fasa berupa fluksi bolak-balik yang terdiri dari dua komponen yaitu fluksi  $\Phi_s$  dan  $\Phi_i$ . Kedua fluksi yang berlawanan arah tersebut akan menghasilkan torsi yang sama besar dan berlawanan arah, yaitu arah maju (*forward*) dan arah mundur (*backward*).

Torsi resultan yang dihasilkan oleh torsi arah maju dan arah mundur pada dasarnya mempunyai kemampuan untuk menggerakkan rotor motor dengan arah maju atau mundur, tetapi pada saat *start* kemampuan masing-masing torsi untuk maju dan mundur sama besarnya, sehingga rotor motor akan tetap diam.

Untuk itu motor memerlukan suatu alat bantu saat *start*, apabila dibantu diberi torsi maju, maka rotor motor akan berputar mengikuti torsi resultan maju, demikian juga sebaliknya bila diberi torsi resultan mundur, maka rotor motor akan berputar sebaliknya (mundur).

Masing-masing komponen fluksi yaitu fluksi sinkron ( $\Phi_s$ ) dan fluksi invers ( $\Phi_i$ ) berputar sekitar stator dan mengimbas

pada rotor maka akan dihasilkan tegangan dan torsi.

Pada saat motor berputar maka akan terdapat slip yang besarnya tergantung dari kecepatan dan arah putaran dari motor, masing-masing slip yang dihasilkan dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Slip yang dihasilkan saat motor berputar dengan arah maju :

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} = 1 - \frac{N_r}{N_s}$$

- Slip yang dihasilkan saat motor berputar dengan arah mundur :

$$S_i = \frac{N_s - (-N_r)}{N_s} = 1 + \frac{N_r}{N_s} \\ = 1 + (1 - S) = (2 - S)$$

Sedangkan besar daya dan torsi yang dihasilkan rotor motor dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut ini :

- Daya yang dihasilkan oleh rotor :

$$P_g = \frac{(1 - S)}{S} I_2^2 R_2$$

- Torsi yang dihasilkan oleh rotor :

$$T_g = \frac{1}{2\pi N_r} \left( \frac{1 - S}{S} \right) I_2^2 R_2$$

dan kecepatan  $N_r = N_s(1 - S)$

maka :

$$T_g = \frac{1}{2\pi N_s} \cdot \frac{I_2^2 R_2}{S}$$

$$k = \frac{1}{2\pi N_s}$$

Sehingga besarnya masing-masing torsi adalah :

- Torsi arah maju :

$$T_s = k \cdot \frac{I_2^2 \cdot R_2}{S}$$

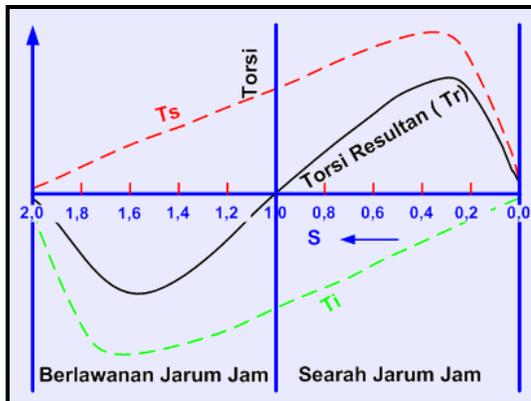
- Torsi arah mundur :

$$T_i = k \cdot \frac{I_2^2 \cdot R_2}{(2-S)}$$

- Torsi Total yang dihasilkan :

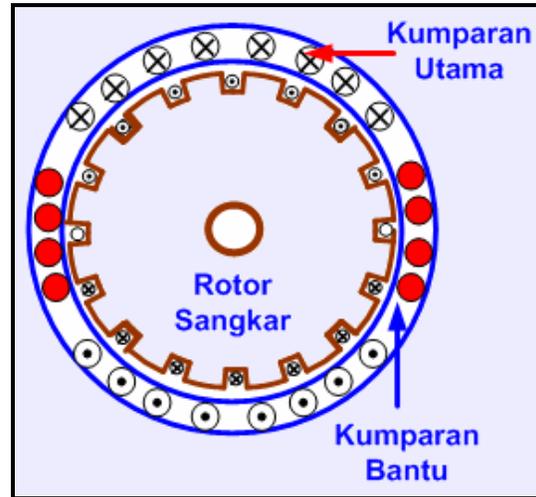
$$T_t = T_s + T_i$$

Pada gambar 5.157 terlihat torsi  $T_s$ ,  $T_i$ , dan  $T_r$  untuk slip antara 0 sampai dengan 2. Titik diam saat  $S=1$  dan  $(2-S)=1$ , pada kondisi ini  $T_s$  dan  $T_i$  sama besarnya yaitu  $\frac{1}{2} T_{max}$  dan arahnya berlawanan sehingga torsi resultan  $T_r = 0$ , hal ini yang menyebabkan motor induksi satu fasa tidak bisa berputar sendiri.



Gambar 5.157 Lengkung Torsi Motor Induksi Satu Fasa

Supaya motor satu fasa bisa *start* sendiri maka motor harus diubah menjadi dua fasa selama periode pengasutan (*starting*). Untuk itu stator motor induksi satu fasa yang hanya memiliki kumparan utama harus ditambah dengan kumparan bantu, dan antara kedua kumparan tersebut harus mempunyai beda fasa sebesar  $90^\circ$  listrik (Gambar 5.158).



Gambar 5.158 Kumparan Bantu Motor Induksi Satu Fasa

Metoda untuk memperoleh perbedaan fasa antara kumparan utama dan kumparan bantu supaya motor dapat *start* sendiri, dapat dilakukan dengan cara :

- Metoda Split Phase ;
- Metoda Capacitor; dan
- Metoda Shaded Pole.

### 5.9.2.3 Rangkaian Pengganti Motor Induksi Satu Fasa

Motor induksi satu fasa dapat dilihat sebagai dua buah motor yang mempunyai kumparan stator bersama, tetapi masing-masing rotor berputar berlawanan arah.

#### ❖ Rangkaian Pengganti tanpa Rugi Inti

Rangkaian pengganti motor induksi satu fasa menurut teori medan ganda dapat dilihat pada gambar 5.159. Motor digambarkan dengan satu lilitan stator dan dua lilitan rotor.

Impedansi Stator :  $Z = R_1 + jX_1$   
 Impedansi masing-masing rotor adalah:  
 $r_2 + jx_2$

Dimana  $r_2$  dan  $x_2$  mewakili harga setengah rotor dipandang dari stator.  
 Selama rugi inti diabaikan, penguatan pada masing-masing cabang hanya terdiri penguatan reaktansi.

Impedansi rotor dengan arah putaran maju :

$$Z_s = \frac{jx_m \left( \frac{r_2}{s} + jx_2 \right)}{\frac{r_2}{s} + j(x_m + x_2)} \text{ Ohm}$$

Impedansi rotor dengan arah putaran mundur :

$$Z_i = \frac{jx_m \left( \frac{r_2}{2-s} + jx_2 \right)}{\frac{r_2}{2-s} + j(x_m + x_2)} \text{ Ohm}$$

Dalam kondisi diam, tegangan arah maju dan arah mundur sama besarnya, dengan tegangan arah mundur ( $V_s = V_i$ ), dan pada saat berputar maju ( $V_s$ ) antara 90% s.d 95% dari tegangan yang diberikan.

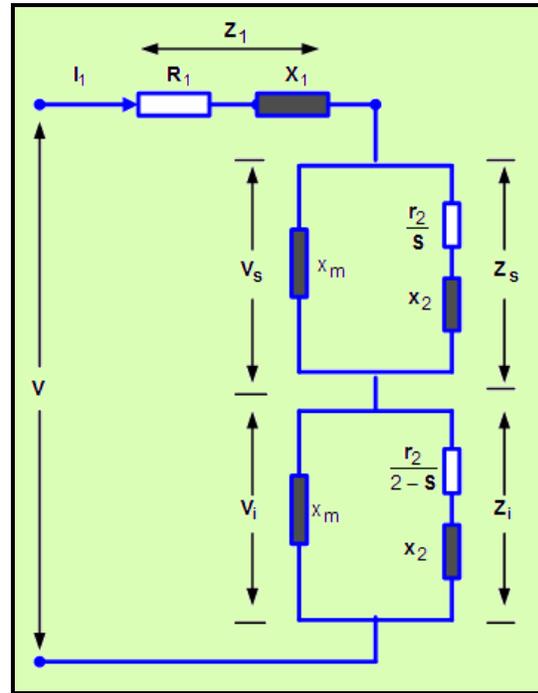
Torsi arah maju :  $T_s = \frac{I_2^2 \cdot r_2}{s}$

Torsi arah mundur :  $T_i = \frac{I_2^2 \cdot r_2}{2-s}$

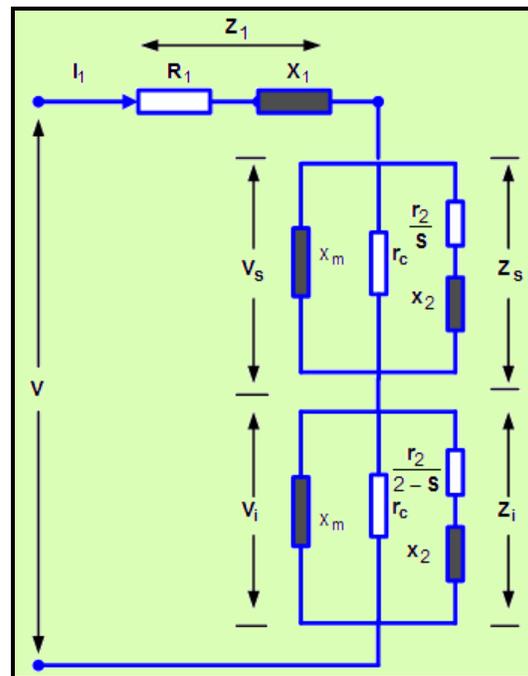
Torsi total yang dibangkitkan :  
 $T_t = T_s + T_i$

❖ **Rangkaian Pengganti dengan Rugi Inti**

Rugi inti dapat diganti dengan tahanan pengganti, dan dihubungkan secara seri atau paralel dengan reaktansi magnetik seperti terlihat pada gambar 5.160 dan 5.161.



Gambar 5.159 Rangkaian Pengganti tanpa Rugi Inti

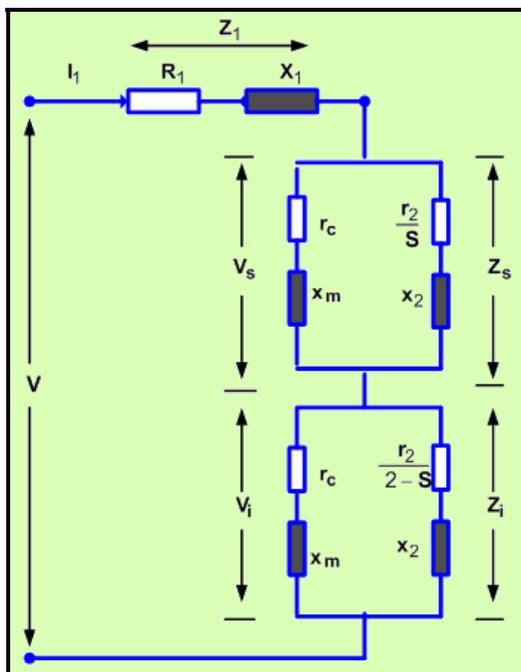


Gambar 5.160 Rangkaian Pengganti dengan Rugi Inti ( $r_c$  Paralel)

Pada gambar 5.160 tahanan pengganti  $r_c$  dihubungkan secara paralel dengan reaktansi magnetik, maka :

$$\text{Impedansi maju } Z_s = \frac{\frac{r_2}{S} + j(x_2 + x_m) + r_c}{jx_m \left( \frac{r_2}{S} + r_c \right) + r_c \left( \frac{r_2}{S} + jx_2 \right) - x_m \cdot x_2}$$

$$\text{Impedansi mundur } Z_i = \frac{\frac{r_2}{(2-S)} + j(x_2 + x_m) + r_c}{jx_m \left( \frac{r_2}{(2-S)} + r_c \right) + r_c \left( \frac{r_2}{(2-S)} + jx_2 \right) - x_m \cdot x_2}$$



Gambar 5.161 Rangkaian Pengganti dengan Rugi Inti ( $r_c$  Seri)

Pada gambar 5.161 tahanan pengganti ( $r_c$ ) dirangkai secara seri dengan reaktansi magnetik, maka :

$$\text{Impedansi maju } Z_s = \frac{(rc + jx_m) \cdot \left( \frac{r_2}{S} + jx_2 \right)}{r_c + \frac{r_2}{S} + j(x_m + x_2)}$$

$$\text{Impedansi mundur } Z_i = \frac{(rc + jx_m) \cdot \left( \frac{r_2}{(2-S)} + jx_2 \right)}{r_c + \frac{r_2}{(2-S)} + j(x_m + x_2)}$$

Tegangan arah maju ( $V_s$ ) saat motor berputar pada putaran nominal sangat besar dan tegangan mundur ( $V_i$ ) rendah.

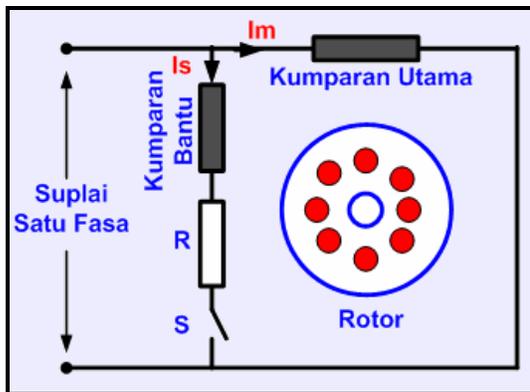
### 5.9.2.4 Motor Split Phase

Motor *Split Phase* (resistance-start motor) adalah motor induksi satu fasa yang memiliki dua buah kumparan pada bagian statornya, yaitu kumparan utama (*main stator winding*) dan kumparan bantu (*auxiliary stator winding*).

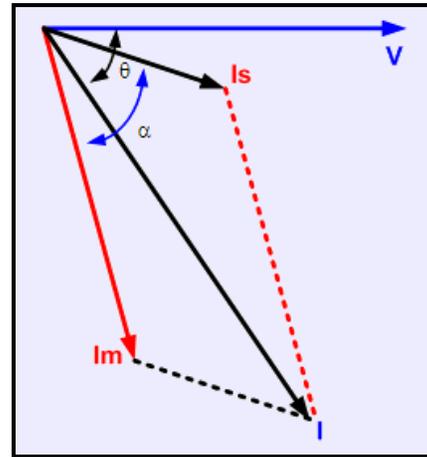
Bila dibandingkan nilai resistansi dan reaktansi kumparan utama dengan kumparan bantu pada motor split phase sebagai berikut :

- Kumparan utama mempunyai nilai resistansi yang kecil dan reaktansi yang besar;
- Kumparan bantu mempunyai nilai resistansi yang besar dan reaktansi yang kecil.

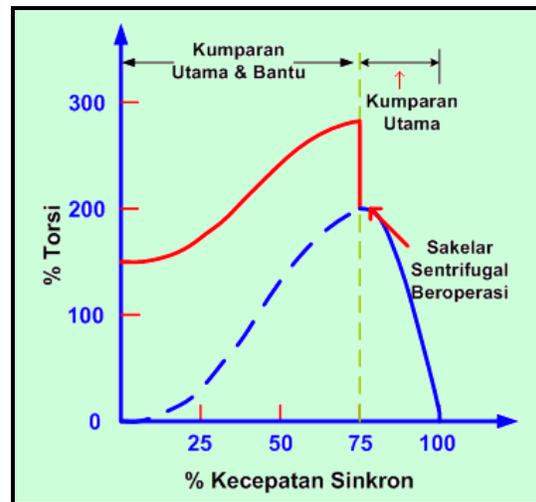
Untuk mendapatkan nilai resistansi yang besar pada kumparan bantu dapat dilakukan dengan memasang tahanan seri atau dengan menggunakan kumparan yang mempunyai tahanan tinggi.



a. Kumparan Stator



b. Vektor Arus



c. Karakteristik

Gambar 5.162 Motor Split Phase

Arus  $I_s$  yang mengalir di kumparan bantu tertinggal dari tegangan  $V$  dengan sudut yang sangat kecil, sedangkan arus  $I_m$  yang mengalir di kumparan utama tertinggal dari tegangan  $V$  dengan sudut yang besar. Sudut fasa antara  $I_m$  dengan  $I_s$  dibuat sebesar mungkin karena torsi yang dihasilkan sebanding dengan  $\sin \alpha$ .

Saklar sentrifugal diletakkan secara seri dengan kumparan bantu dan terletak dibagian dalam motor. Fungsi saklar sentrifugal adalah sebagai alat pemutus

otomatis suplai tegangan dari sumber ke kumparan bantu, apabila putaran motor telah mencapai 75% dari kecepatan nominal motor.

Saat start, torsi yang dihasilkan motor split phase berkisar antara 150% s.d 200% dari torsi beban penuh. Sedangkan arus startnya bisa mencapai 6 (enam) s.d 8 (delapan) kali arus nominal motor.

Motor Split Phase pada umumnya digunakan untuk daya yang kecil, yaitu antara 1/20 hp s.d 1 hp dengan putaran dari 865 Rpm sampai 3450 Rpm.

#### ➤ **Motor Split Phase Dua Kecepatan**

Untuk mengubah kecepatan motor split phase dapat dilakukan dengan cara mengubah jumlah kutub, yang pada umumnya dilakukan untuk putaran yang searah, yaitu dengan cara :

- a. Menambah jumlah kumparan utama dengan kumparan bantu tetap;
- b. Menggunakan dua kumparan utama dan dua kumparan bantu;
- c. Menggunakan hubungan khusus, yaitu hubungan *consequent-pole* tanpa menambah kumparan utama atau kumparan bantu.

#### **5.9.2.5 Motor Kapasitor**

Motor kapasitor biasanya dioperasikan pada rating daya antara 1/8 hp s.d 1 hp. Konstruksi motor kapasitor hampir sama dengan motor split phase, perbedaannya hanya pada penambahan unit kapasitor yang dihubungkan secara seri dengan kumparan utama atau kumparan bantu. Kapasitor biasanya diletakan dibagian luar motor atau berada didalam rumah motor.



Gambar 5.163. Motor Kapasitor

Tipe-tipe motor kapasitor adalah :

- Motor Kapasitor-Start, kapasitor ini digunakan selama periode *start*(pelepasan) motor;
- Motor Kapasitor-Run, kapasitor digunakan selama periode *start* dan *run (jalan)*;
- Motor Kapasitor- Start Kapasitor-Run, dalam motor ini digunakan dua buah kapasitor, yaitu satu untuk start dan satu lagi untuk jalan(*run*).

#### **Cara Menjalankan Motor Kapasitor**

Selama periode start lilitan bantu dan lilitan utama dihubungkan ke sumber tegangan dan posisi saklar sentrifugal tertutup. Kumparan bantu dihubungkan secara seri dengan kapasitor dan saklar sentrifugal. Setelah putaran motor mencapai 75% dari kecepatan nominal saklar sentrifugal akan membuka sehingga motor hanya bekerja dengan kumparan utama saja. Putaran medan magnet harus dihasilkan didalam motor supaya timbul perbedaan fasa sebesar 90° listrik antara kumparan utama dengan kumparan bantu.

Kapasitor digunakan untuk mengalirkan arus ke kumparan bantu untuk mencapai harga maksimum sebelum arus dari kumparan utama mencapai maksimum,

jadi arus dari kumparan bantu akan mendahului arus dari kumparan utama. Kondisi ini akan menghasilkan medan magnet putar didalam stator, yang akan mengakibatkan rotor motor akan berputar.

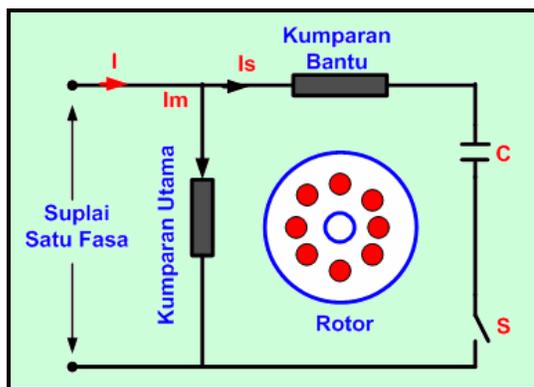
### 1. Motor Kapasitor-Start

Pada saat start motor akan menghasilkan Torsi start (asut) yang tinggi bila kapasitor dihubungkan secara seri dengan kumparan bantu (Gambar 5.164a) Pemasangan kapasitor menaikan sudut fasa antar arus kumparan (Gambar 5.164b). Karakteristik torsi – kecepatan diperlihatkan pada gambar 5.164c. Tipikal nilai kapasitor untuk motor 0,5 hp adalah 300 uF dari tipe electrolytic.

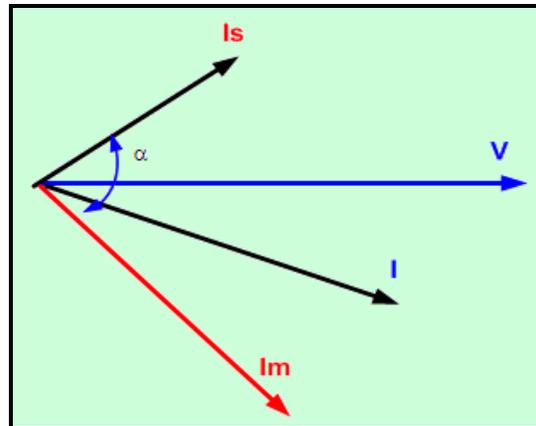
Rangkaian ekuivalen motor *capacitor-start* pada saat pengasutan (starting) dapat direpresentasikan seperti diperlihatkan pada gambar 5.164d, dan berdasarkan rangkaian ekuivalen ini kita bisa menurunkan persamaan untuk menentukan nilai kapasitor untuk start.

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = X_a + \frac{R_a R_m}{|Z_m| + X_m}$$

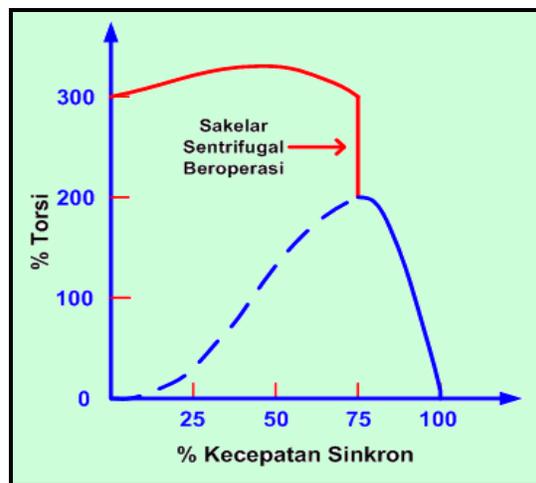
$$C = \frac{1}{\omega \left( X_a + \frac{R_a R_m}{|Z_m| + X_m} \right)}$$



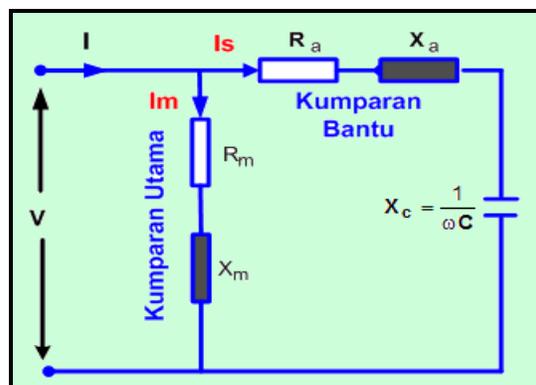
a. Rangkaian Kapasitor-Start



b. Vektor Arus Kapasitor-Start



c. Karakteristik Kapasitor-Start



d. Rangkaian Ekuivalen Kapasitor-Start

Gambar 5.164 Motor Kapasitor-Start

## 2. Motor Kapasitor-Run

Motor Kapasitor-Run (Kapasitor Jalan) ini sama dengan motor *kapasitor-start*, kecuali kumparan bantu dan kapasitor terhubung pada rangkaian sepanjang waktu, sehingga tidak diperlukan lagi saklar sentrifugal.

Keuntungan kapasitor dipasang secara permanen pada motor adalah :

- Memperbaiki kapasitas beban lebih pada motor;
- Faktor daya motor jadi tinggi;
- Efisiensi yang tinggi;
- Suara motor halus dan tidak bising.

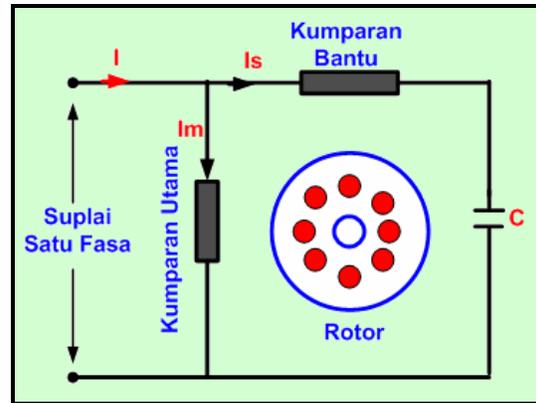
Kapasitor digunakan untuk starting (pengasutan) dan menjalankan motor. Karena kapasitor digunakan saat pengasutan dan jalan, maka harus dipilih nilai kapasitor yang tepat. Umumnya kapasitor yang digunakan adalah tipe *ac paper oil* dengan nilai antara 20 uF s.d 50 uF.

## 3. Motor Kapasitor-Start Kapasitor-Run

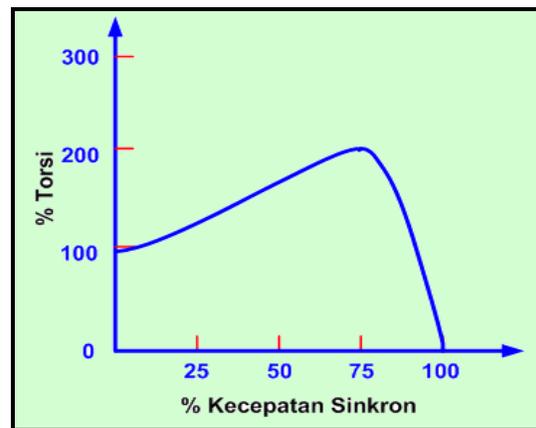
Pada motor jenis ini terdapat dua buah kapasitor, satu kapasitor digunakan saat start ( $C_r$ ) dan satu lagi saat jalan ( $C_s$ ). Nilai kapasitor untuk start lebih besar dibandingkan dengan nilai kapasitor untuk jalan. Tipe kapasitor yang digunakan untuk *start* dan jalan biasanya berbeda, tipe kapasitor start electrolytic dan untuk kapasitor jalan adalah *paper oil*.

Tipikal nilai kapasitor yang digunakan untuk motor 0,5 hp adalah  $C_s = 300 \text{ uF}$  dan  $C_r = 40 \text{ uF}$ .

Motor tipe ini harganya lebih mahal bila dibandingkan dengan jenis motor kapasitor *start* dan *run*, sebanding dengan unjuk kerjanya yang paling baik diantara jenis motor kapasitor.

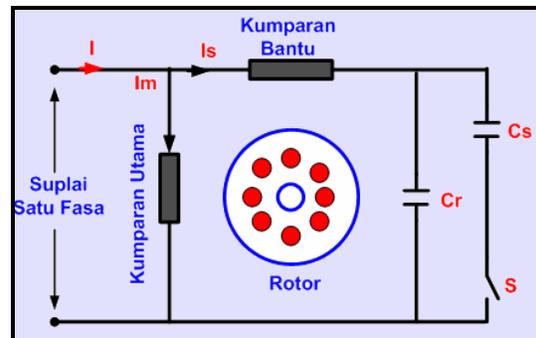


a. Rangkaian Motor Kapasitor-Run

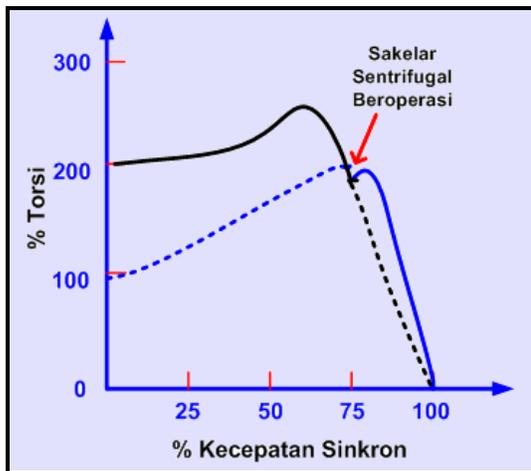


b. Karakteristik Motor Kapasitor-Run

Gambar 5.165 Motor Kapasitor-Run



a. Rangkaian Motor Kapasitor-Start Kapasitor-Run



b. Karakteristik Motor Kapasitor-Start Kapasitor-Run

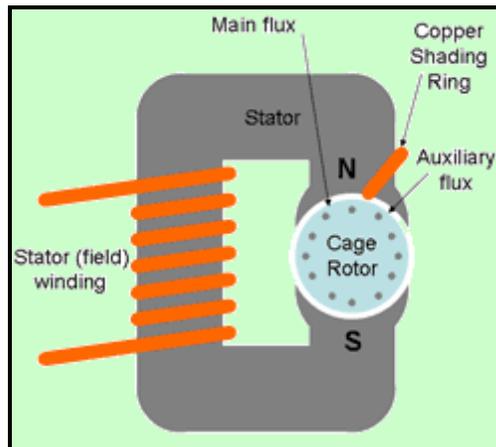
Gambar 5.166 Motor Kapasitor-Start Kapasitor-Run

### 5.9.2.6 Motor Shaded-Pole

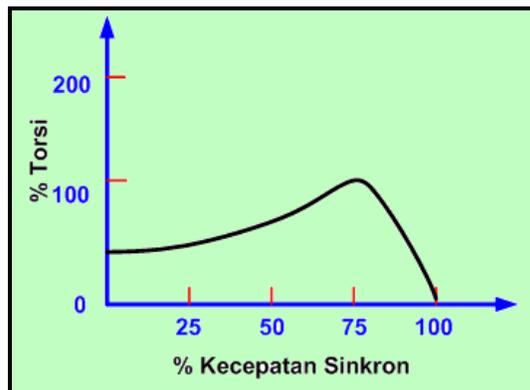
Perbedaan konstruksi motor *shaded-pole* (kutub bayangan) yang sangat menonjol bila dibandingkan dengan konstruksi motor induksi satu fasa yang lainnya adalah pada bagian statornya, bagian kutub magnet stator motor dibelah dan diberi cincin pada bagian ujung kutubnya, yang biasa disebut kutub bayangan. Sedangkan jenis rotor yang digunakannya sama dengan motor induksi satu fasa yang lainnya yaitu rotor sangkar. Motor kutub bayangan biasanya digunakan pada peralatan dengan kapasitas daya yang kecil seperti pada motor-motor kipas angin kecil.

Gambar 5.167a memperlihatkan sebuah motor kutub bayangan, yang kutubnya diberi alur dan dilingkari dengan satu lilitan hubung singkat dari bahan tembaga.

Medan putar yang dihasilkan pada motor jenis ini adalah karena adanya induksi pada cincin hubung singkat yang terdapat pada kutub bayangan yang berasal dari pengaruh induksi magnet kutub yang lainnya, sehingga motor ini menghasilkan fluks magnet yang berputar.



a. Konstruksi Motor Shaded-Pole



b. Karakteristik Motor Shaded-Pole

Gambar 5.167 Motor Shaded-Pole

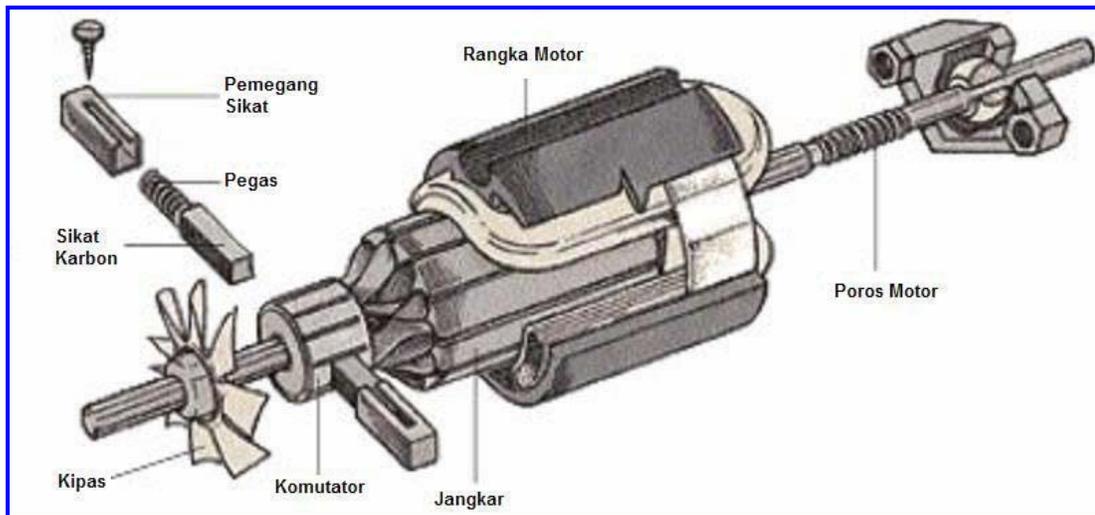
### 5.9.2.7 Karakteristik Motor Shaded-Pole

Sebagai penutup dari bahasan motor induksi satu, pada tabel 5.8 diperlihatkan karakteristik dan aplikasi motor induksi satu fasa secara umum.

Tabel 5.8 Karakteristik dan Penggunaan Motor Induksi Satu Fasa

Tipe Motor	% Torsi dari Torsi Nominal		Breakdown (Patah)	Beban Nominal		Range Daya (HP)	Perkiraan Perbandingan Harga (%)	Penggunaan
	Starting (Asut)			Faktor Daya	Efisiensi			
Split-phase (resistance-start)	100 – 250		Diatas 300	50 – 65	55 – 65	1/20-1	100	Kipas, blowers, pompa sentrifugal, mesin cuci, dll. Beban yang membutuhkan torsi rendah atau sedang.
Capacitor-start	250 – 400		Diatas 350	50 – 65	55 – 65	1/8 – 1	125	Kompresor, pompa, konveyor, refrigerator, peralatan AC, mesin cuci, dan peralatan yang pengasutan dengan beban berat.
Capacitor-run	100 – 200		Diatas 250	75 – 90	60 – 70	1/8 – 1	140	Kipas, blowers, pompa sentrifugal, dll. Beban yang membutuhkan tingkat kebi-singan rendah
Capacitor-start, Capacitor-run	200 – 300		Diatas 250	75 – 90	60 – 70	1/8 – 1	180	Kompresor, pompa, konveyor, refrigerator, dll. Beban yang membutuhkan kebi-singan rendah dan Torsi asut(start) yang tinggi.
Shaded-pole	40 – 60		140	25 – 40	25 – 40	1/200-1/20	60	Kipas, pengering rambut, mainan, dll. Beban yang membutuhkan torsi asut yang rendah.

### 5.9.3 Motor Seri Satu Fasa (Universal)



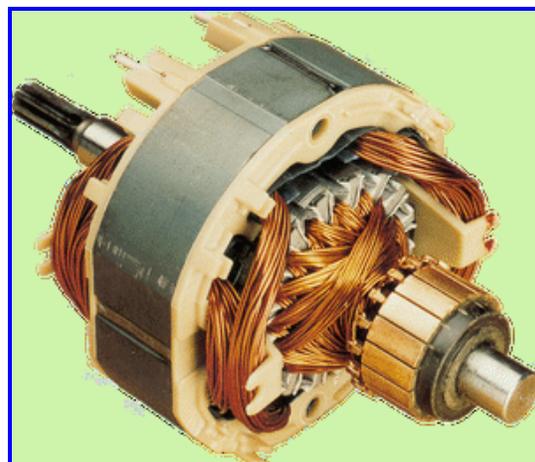
Gambar 5.168 Konstruksi Motor Universal

Motor universal terdiri dari sebuah rotor yang biasa disebut armatur atau jangkar, dengan lilitan kumparan sekelilingnya, dan diujung poros diletakkan komutator yang dibagi atas beberapa lamel. Pada permukaan komutator diletakkan sikat karbon yang berfungsi untuk mengalir arus dari sumber luar ke dalam jangkar motor. Saat arus mengalir ke dalam jangkar, maka di jangkar akan timbul medan magnet, sehingga jangkar akan berputar diantara kutub magnet yang berada di stator motor.

Hampir semua motor universal memiliki kipas pendingin di bagian ujung porosnya. Motor universal banyak digunakan pada peralatan listrik dengan ukuran kecil dan sedang, seperti pengisap debu, mesin jahit dan sejenisnya.

Motor universal bisa dioperasikan dengan sumber arus searah atau bolak-balik. Kecepatan motor bisa diatur dengan menggunakan rheostat, penyearah, atau perubahan kedudukan sikat karbon yang melewati jangkar motor.

Perawatan motor universal relatif mudah, kebanyakan motor tidak berfungsi dengan baik diakibatkan karena kontak sikat karbon ke permukaan komutator tidak baik, ini bisa dilihat dengan adanya *spark* pada permukaan komutator, sehingga kontak listrik menjadi tidak sempurna. Apabila hal seperti ini terjadi, maka kita harus mengatur kembali posisi sikat atau mengganti sikat dengan yang baru.



Gambar 5.169 Jangkar Motor Universal

## 5.10 Generator Set

### 5.10.1 Pendahuluan

Generator set atau disingkat Genset merupakan seperangkat pembangkit tenaga listrik yang merupakan gabungan antara mesin penggerak yang berupa mesin diesel sebagai penggerak mula dan generator sebagai mesin yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Pada umumnya generator yang digunakan adalah jenis generator sinkron seperti telah dibahas pada sub bab sebelumnya.

Genset biasanya dimanfaatkan sebagai pembangkit energi listrik pada daerah-daerah atau lokasi yang belum terjangkau oleh suplai listrik PLN, selain itu genset banyak dimanfaatkan sebagai sumber daya darurat (catu daya darurat) ketika PLN atau sumber utama daya listrik mengalami pemadaman.

Pengertian dan definisi Genset darurat menurut PUIL 2000 (Pasal 8.21.1.1) adalah :

"Keadaan darurat adalah keadaan yang tidak biasa atau tidak dikehendaki yang membahayakan keselamatan manusia, bahaya kebakaran dan keamanan bangunan serta isinya, yang ditimbulkan karena penyediaan listrik utama terganggu. Penerangan darurat biasanya dipasang di gedung-gedung umum yang banyak dikunjungi orang seperti hotel, pasar, toserba, gedung pertunjukan, tempat ibadah, gelanggang olah raga, rumah sakit dan gedung lain yang sejenisnya. Genset darurat dapat menyediakan daya untuk beberapa keperluan seperti pendingin, pelayanan alat bantu mekanis, ventilasi jika penting untuk keselamatan jiwa, penerangan dan tenaga untuk kamar operasi di rumah sakit, sistem alarm kebakaran, proses industri yang bila aliran listrik terputus dapat menyebabkan bahaya yang serius, komunikasi dan hal yang sejenisnya".



Sumber: [http://www.chinapower-online.com/Mitsubishi\\_series.html](http://www.chinapower-online.com/Mitsubishi_series.html)

Gambar 5.170 Contoh Generator Set

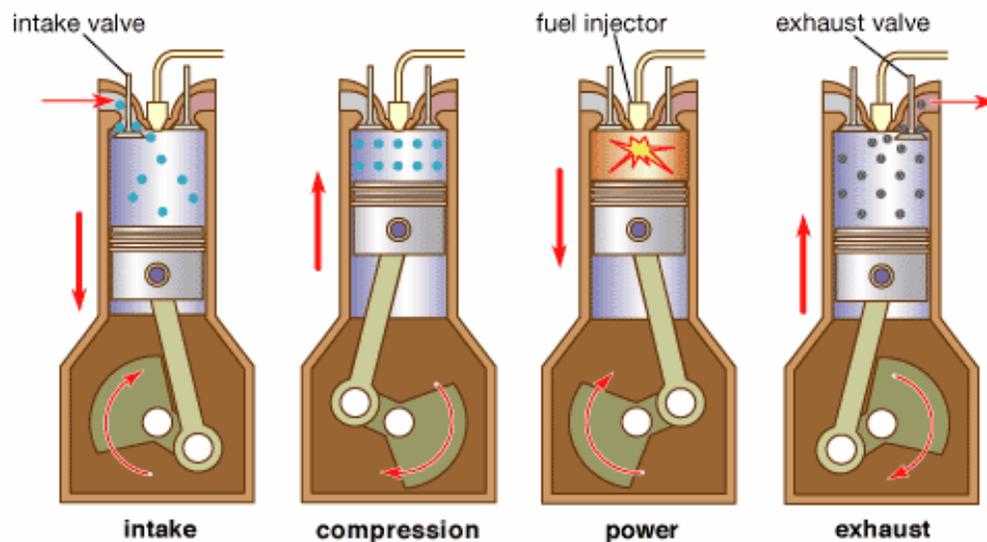
Pada pasal berikutnya (pasal 8.21.3.1.1) dijelaskan bahwa generator darurat harus memenuhi beban sebagai berikut:

- ❖ Kelengkapan penggerak utama yang menggunakan tenaga listrik dan perlengkapan pengasutan.
- ❖ Lift keadaan darurat dengan anggapan pada suatu kumpulan lift hanya satu lift yang bekerja.
- ❖ Daya yang digunakan untuk menurunkan lift.
- ❖ Kipas untuk mengisap asap.
- ❖ Pompa air untuk sistem pemadam kebakaran saat terjadi kebakaran.
- ❖ Pemanfaatan listrik yang digunakan pada saat terjadi kebakaran.
- ❖ Penerangan darurat yang dihubungkan dengan generator tersebut.
- ❖ Jumlah beban lain yang dapat disuplai dari sistem pembangkit tersebut kecuali yang tersebut dalam 8.21.3.1.1.

## 5.10.2 Mesin Diesel

Jika ditinjau dari cara memperoleh energi termalnya, motor diesel atau mesin diesel dikelompokkan ke dalam mesin dengan pembakaran dalam mesin itu sendiri, yaitu proses pembakaran terjadi di dalam silinder mesin, sehingga gas pembakaran yang terjadi sekaligus berfungsi sebagai fluida kerja.

Motor menggunakan beberapa selinder, dimana didalamnya terdapat torak yang bergerak secara translasi (bolak-balik). Di dalam silinder inilah terjadi pembakaran antara bahan bakar dengan oksigen dari udara. Gas pembakaran yang dihasilkan oleh proses tersebut mampu menggerakkan torak yang menyebabkan gerakan rotasi pada poros engkol dan sebaliknya gerak rotasi poros engkol menimbulkan gerak translasi pada torak.



© 2007 Encyclopædia Britannica, Inc.

Gambar 5.171 Prinsip Kerja Mesin Diesel

Prinsip kerja mesin diesel bila ditinjau dari sistem penyalaan bahan bakarnya, disebut motor penyalaan kompresi. Karena cara penyalaan bahan bakarnya dilakukan dengan menyemprotkan bahan bakar ke dalam silinder berisi udara bertemperatur dan bertekanan tinggi. Cara kerja mesin diesel dapat dijelaskan seperti pada gambar 5.171.

Proses pembakaran di dalam motor bakar terjadi secara berulang-ulang (periodik), yaitu setiap satu siklus mengalami 2 kali putaran poros engkol dan membutuhkan 4 langkah kerja.

### 1. Langkah Isap

Pada awal langkah isap, piston berada pada Titik Mati Atas (TMA) dan kecepatan torak nol (belum bergerak). Torak bergerak menuju Titik Mati Bawah (TMB), katup isap (*intake valve*) terbuka, sehingga udara bersih masuk ke dalam silinder. Langkah isap ini berlangsung hingga piston mencapai TMB.

### 2. Langkah Kompresi

Setelah mencapai TMB, torak bergerak kembali ke TMA, sementara katup isap dan katup buang tertutup. Udara yang telah ada di dalam silinder terkompresi oleh torak yang bergerak ke TMA. Volume udara kini menjadi kecil sehingga tekanan dan temperaturnya naik.

### 3. Langkah Ekspansi

Pada saat torak hampir mencapai TMA, bahan bakar disemprotkan ke dalam silinder dan terjadilah proses pembakaran sehingga tekanan dan temperaturnya naik. Sementara itu torak masih bergerak menuju TMA, berarti volume ruang bakar menjadi semakin kecil sehingga tekanan dan temperatur udara bahan bakar di dalam silinder menjadi semakin

tinggi. Akhirnya torak mencapai TMA dan gas pembakaran mampu mendorong torak untuk bergerak kembali dari TMA ke TMB. Pada saat yang sama, baik katup isap (*intake valve*) maupun katup buang (*exhaust valve*) masih tertutup. Dalam proses ini volume gas pembakaran di dalam silinder bertambah besar dan tekanannya turun.

### 4. Langkah Buang

Apabila torak telah mencapai TMB, katup buang sudah terbuka sedangkan katup isap tetap tertutup. Torak bergerak kembali ke TMA mendesak gas yang sudah terbakar keluar dari dalam silinder melalui saluran buang. Setelah langkah buang ini selesai, siklus kerja baru dimulai lagi dari langkah isap dan seterusnya.

#### 5.10.2.1 Bagian-bagian Utama Mesin Diesel

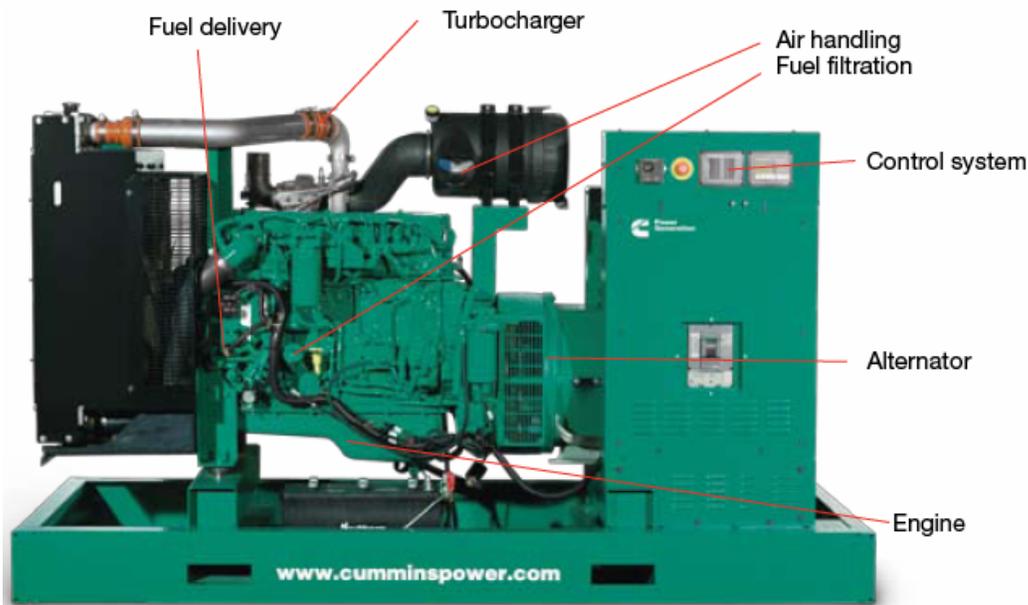
Bagian-bagian utama yang berfungsi sebagai penunjang operasional Mesin Diesel adalah sistem bahan bakar, sistem pelumasan, sistem pendingin serta sistem udara dan gas buang.

##### 1. Sistem Bahan Bakar

Fungsi Sistem bahan bakar adalah mengalirkan bahan bakar mulai dari tangki bahan bakar sampai menyemprotkan dari pengabut pada waktu pembakaran di dalam silinder. Jenis bahan bakar yang digunakan umumnya adalah minyak solar atau minyak IDO (Ignation Diesel Oil).

##### 2. Sistem Pendingin

Saat genset beroperasi, maka temperatur kerja mesin akan meningkat, untuk



Sumber: <http://www.cumminspower.com>

Gambar 5.172 Bagian-bagian Utama Generator Set

menurunkannya diperlukan sistem pendinginan dengan menggunakan air.

Air yang digunakan untuk sistem pendinginan adalah air murni yang tidak mengandung kotoran dan kadar garam untuk mencegah terjadinya korosi. Air berfungsi untuk mendinginkan blok silinder dan *turbocharger*.

### 3. Sistem Pelumasan

Fungsi sistem pelumasan adalah untuk mengurangi keausan mesin dengan cara mengalirkan minyak pelumas dari karter ke bagian-bagian yang memerlukan pelumasan pada waktu mesin sedang beroperasi.

### 4. Sistem Udara dan Gas Bekas

Fungsi sistem udara dan gas bekas (buang) adalah untuk mengatur udara pembakar ke dalam ruang bakar atau silinder diwaktu langkah isap, udara ini dikompresikan waktu langkah kompresi

dan mengeluarkan gas bekas dari silinder waktu langkah buang.

Knalpot adalah bagian dari mesin diesel yang berfungsi untuk menyalurkan gas bekas sisa pembakaran ke udara luar, selain itu knalpot berfungsi juga sebagai peredam getaran akibat ledakan pembakaran dan tekanan gas buang.

## 5.10.3 Mengoperasikan Generator Set

### 5.10.3.1 Menganalisa Data Pengoperasian

Saat melakukan pengoperasian generator set ada beberapa hal yang harus diperhatikan:

- 1) Menerapkan prosedur pengoperasian generator set sesuai dengan kriteria unjuk kerja yang mencakup peralatan yang berkaitan dengan

pengoperasian dan diagram kerja dengan prinsip kerjanya.

- 2) Mengidentifikasi alat ukur dengan kriteria unjuk kerja yang mencakup instrumen yang berupa besaran listrik maupun besaran mekanik ( arus, tekanan, suhu, dll) diinterpretasi sesuai dengan prinsip kerja, prosedur dan hasilkan dibandingkan dengan nilai / angka yang ditetapkan dalam sistem sesuai dengan batasan operasi.
- 3) Mengoperasikan generator set sesuai dengan kriteria unjuk kerja yang mencakup seluruh komponen dan sistem pendinginan siap dioperasikan sesuai dengan standar. Sistem air pendingin dioperasikan dengan urutan kerja sesuai SOP.

Untuk meyakinkan bahwa mesin genset dioperasikan sesuai dengan unjuk kerjanya, maka perlu diamati data mesin genset sebelum dioperasikan. Berikut ini contoh data sebuah mesin genset :

### 1. Engine Data (Data Mesin )

Manufacture/Type (Pabrikan/ Tipe)	:	<b>POWERING/ NEM 435 WA, 4- cycle</b>
Air Intake System (Sistem Udara Masuk)	:	<b>Turbo, Air/ Air Cooling</b>
Fuel System (Sistem Bahan Bakar)	:	<b>Elec.Injection Fuel System</b>
Cylinder Arrangement (Susunan Silinder)	:	<b>6 in line</b>
Bore and Stroke	:	<b>120×138mm</b>
Compression Ratio (Perbandingan Kompresi)	:	<b>17.4 : 1</b>
Rated RPM (Kecepatan RPM)	:	<b>1500</b>
Governor Type (Tipe Governor)	:	<b>Engine Management System 1</b>

<b>Exhaust System (Sistem Pembuangan)</b>	
Exhaust Gas Flow (Aliran Gas Buang)	: <b>52.2 m3/min</b>
Exhaust Temperature ( Temperatur Pembuangan)	: <b>519° C</b>
Max Back Pressure (Tekanan Balik Maksimum)	: <b>10kPA</b>

<b>Air Intake System (Sistem Udara Masuk)</b>	
Max Intake Restriction(Batas Pe-masukkan Maks)	: <b>5kPA</b>
Burning Capacity (Kapasitas Pembakaran)	: <b>19.6m3/min</b>
Intake Flow (Aliran Masuk)	: <b>456m3/min</b>

<b>Fuel System (Sistem Bahan Bakar)</b>	
110%(Standby Power) Load	: <b>73.6 L/h</b>
100%(Prime Power) Load	: <b>66.3L/h</b>
75%(Prime Power) Load	: <b>49.2L/h</b>
Total Fuel Flow	: <b>108L/h</b>

<b>Oil System (Sistem Oli)</b>	
Total Oil Capacity (Total Kapasitas Oli)	: <b>35L</b>
Oil Consumption (Konsumsi Oli)	: <b>0.04L/h</b>
Engine Oil Tank Capacity (Kapasi-tas Tangki Oli Mesin)	: <b>31L</b>
Oil Pressure at Rated RPM (Tekanan Oli pada RPM nominal)	: <b>350kPA</b>

Cooling System (Sistem Pendinginan)	
Total Coolant Capacity (Kapasitas Total Pendinginan)	: 41L
Thermostat	: 82-92°C
Max Water Temperature ( Temperatur Air Maks)	: 103°C

## 2. Alternator Data (Data Alternator)

Manufacture/Type (Pabrik/ Tipe)	: POWERING/ PWR 888P3
Number of Phase (Jumlah Fasa)	: 3
Connecting Type (Tipe Hubungan)	: 3 Phase and 4 Wires, "Y" type connecting
Power Factor (Faktor Daya)	: 0.8
Protection Grade (Kelas Proteksi)	: IP23
Exciter Type (Tipe Penguatan)	: Brushless, self- exciting
Insulation Class/ Temperature Rise ( Kelas Isolasi)	: H/H
Voltage Regulation (Pengaturan Tegangan)	: $\leq \pm 1\%$
Alternator Capacity (Kapasitas Alternator)	: 325 KVA
Alternator Efficiencies (Efisiensi Alternator)	: 93.3%
Air Cooling Flow (Aliran Pendinginan Udara)	: 0.486m <sup>3</sup> /s

## 5.10.3.2 Mempersiapkan Pengoperasian Genset

Langkah-langkah persiapan yang harus dilakukan adalah memeriksa kondisi mesin dan sistem pendukungnya. Yakinkan sistem baterai (*accumulator*) dalam keadaan *stand by* dan harus selalu diisi (*charging*) secara baik sehingga dapat menunjang keandalan dan kesiapan penyalaan mula (*start up*).

Saat pemeriksaan harus diperhatikan juga mur baut yang ada pada bagian: *mesin, fuel injection pump, cylinder heads, timing gear, crankshaft pulley, coupling-drive shaft, mounting bracket, turbo charger, dan exhaust pipe*. Perhatikan jangan sampai ada mur baut yang lepas atau longgar.

Bagian-bagian lain yang harus diperiksa sebelum genset dioperasikan adalah:

- Sistem Bahan Bakar (Fuel System)
- Sistem Pelumasan (Lubrication System)
- Sistem Pendingin (Cooling System)
- Sistem Udara Masuk (Air Inlet System)
- Sistem Kelistrikan (Electrical System)

### 1) Pemeriksaan Sistem Bahan Bakar

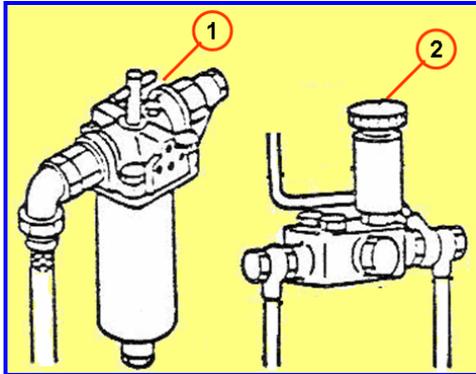
Sebelum melakukan pengisian bahan bakar pada tangki, periksa terlebih dahulu kondisi tangki dan pipa-pipanya bersih dari air, kotoran, dan bahan lainnya yang akan mengganggu sistem pembakaran mesin.

Setelah pemeriksaan selesai dilakukan, baru lakukan pengisian bahan bakar. Setelah pengisian, yakinkan bahan bakar berada pada batas *level* yang mencukupi dengan cara mengamati penunjukan *level gauge* bahan bakar.

Selanjutnya sebelum pompa bahan bakar dioperasikan, lakukan pemeriksa-

an terlebih dahulu pada bagian saringan (*filter*) bahan bakar dengan cara sebagai berikut :

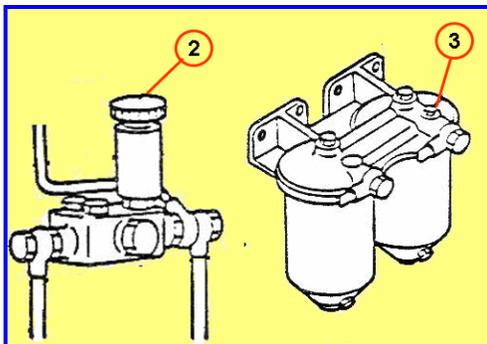
**a. Fuel Filters (Wire Element Type)**



Gambar 5.173 Fuel Filters (Wire-element Type)

- Buka tutup venting udara (1) dari filter
- Buka priming handle pump (2) dari pompa bahan bakar dengan memutar berlawanan arah jarum jam, periksa filter dan coba operasikan.
- Kencangkan kembali penutup (1), indikator penutup tersebut baik ketika ada aliran bahan bakar, maka tidak terjadi gelembung udara.

**b. Fuel Filter (Paper Element Type)**

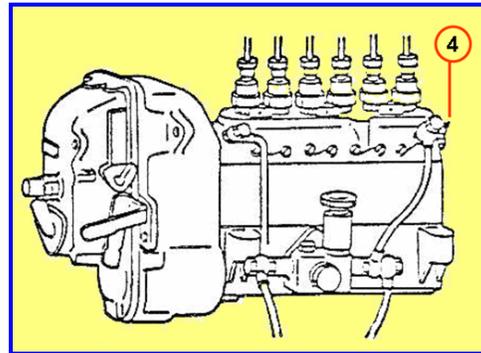


Gambar 5.174 Fuel Filters (Paper Element Type)

- Longgarkan penutup venting udara (3) dari fuel filter

- Operasikan *priming pump handle* (2)
- Kencangkan kembali (3) ketika aliran bahan bakar tidak terjadi gelembung udara

**c. Pompa Injeksi Bahan Bakar (Fuel Injection Pumps)**



Gambar 5.175 Pompa Injeksi Bahan Bakar

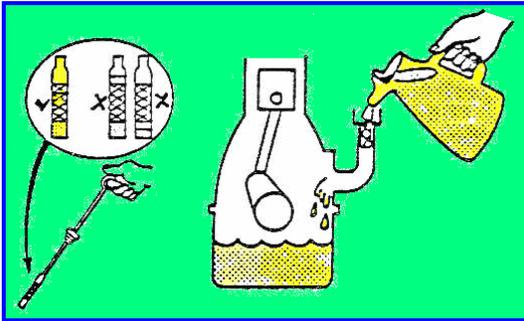
- Longgarkan penutup venting udara (4) pompa injeksi bahan bakar
- Operasikan *priming pump* sampai aliran bahan bakar pada penutup tidak terjadi gelembung udara. Kencangkan *priming pump* dengan cara memutar searah jarum jam dan lakukan peneanan sebelum pengencangan penutup venting terakhir.

**2) Pemeriksaan Sistem Pelumasan (Lubrication System)**

Tujuan pemeriksaan sistem pelumasan adalah untuk memastikan bahwa mesin terisi pelumas dengan cukup sehingga bisa melumasi bagian-bagian mesin secara baik, untuk menghindari terjadinya keausan pada bagian-bagian mesin.

Pemeriksaan minyak pelumas dilakukan dengan cara mencabut tuas duga minyak pelumas (oil level) berada pada level sekitar tigaperempat dari level yang seharusnya seperti yang diperlihatkan pada gambar 5.176. Bila level tidak mencukupi maka lakukan menam-

bahan minyak pelumas dengan menggunakan penuang yang bersih dengan minyak pelumas sesuai standar/ direkomendasikan pembuat mesin.



Gambar 5.176 Pemeriksaan Minyak Pelumas

### 3) Pemeriksaan Sistem Pendingin (Coolant System)

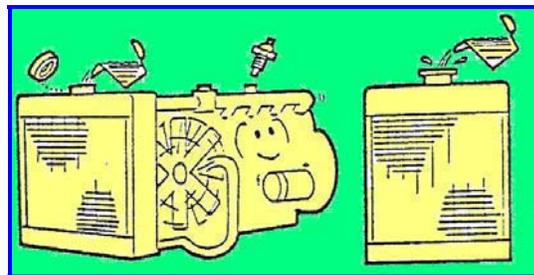
Tujuan pemeriksaan sistem pendingin adalah untuk memastikan bahwa mesin beroperasi dengan pendinginan yang memadai sehingga terhindar dari proses keausan dan tidak terjadi pemanasan yang berlebihan yang bisa mengakibatkan kerusakan pada mesin atau menurunnya efisiensi mesin.

Pemeriksaan sistem pendingin dilakukan dengan cara sebagai berikut :

- Periksa dan yakinkan tidak ada kebocoran atau rembesan air secara teliti pada setiap bagian sistem pendingin terutama di bagian radiator .
- Periksa level air pada radiator dan pastikan bahwa level pendingin (coolant level) mencukupi, bila kurang tambahkan air sampai level yang mencukupi.
- Engkol (*Cranking*) mesin dengan menutup bahan bakar selama 30 detik untuk meyakinkan tekanan

minyak menunjukkan normal. Jika tekanan minyak tidak naik dalam 30 detik, biarkan 1 menit sebelum dilakukan cranking kembali.

- Jalankan mesin dengan kecepatan 600 sampai 700 rpm dalam tiga sampai lima menit.
- Hentikan mesin dan periksa level air pendingin . Bila level air menunjukkan penurunan (rendah) tambahkan kembali air pendingin.
- Periksa kembali radiator dan yakinkan tidak ada rembesan dan kebocoran air dari sambungan-sambungan dan penutup radiator.



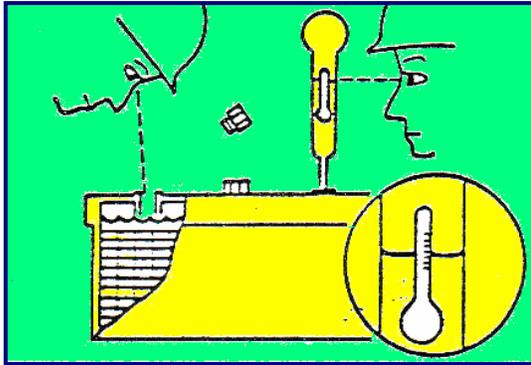
Gambar 5.177 Pemeriksaan Sistem Pendingin

### 4) Sistem Udara Masuk (Air Inlet)

Tujuan pemeriksaan sistem udara masuk adalah untuk memastikan bahwa sistem saringan udara pembakaran dalam kondisi optimal sehingga debu/ kotoran dapat tersaring dan tidak masuk ke ruang bakar.

### 5) Pemeriksaan Sistem Kelistrikan (Electrical System)

Tujuan pemeriksaan sistem kelistrikan adalah untuk memastikan *start up* mesin diesel dapat dilakukan tanpa mengalami kesulitan yang diakibatkan oleh kurangnya pasokan tegangan/tenaga dari baterai (accumulator).



Gambar 5.178 Pemeriksaan Baterai

Langkah-langkah pemeriksaan yang harus dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. Buka tutup baterai (accumulator), lalu periksa level larutan elektrolit pada masing-masing sel, pastikan berada pada 1 cm diatas lempeng-lempeng sel.
- b. Bila level terlalu rendah tambahkan larutan elektrolit pada sel-sel yang memiliki level rendah.
- c. Periksa semua terminal-terminal baterai, bila ada yang longgar lakukan pengencangan.
- d. Setelah selesai operasi genset, periksa kembali level elektrolit, bila ada rendah tambahkan air murni.
- e. Periksa *Spesific Gravity (SG)* elektrolit bila dibawah ketentuan, isi (*charge*) kembali baterai.

### 5.10.3.3 Melaksanakan Pengoperasian Genset

Untuk mengoperasikan genset harus dilakukan sesuai dengan SOP (Standard Operation Procedure) yang berlaku pada institusi/perusahaan pengguna genset tersebut.

Secara umum prosedur/tahapan pengoperasian genset adalah : tahap pengasutan awal (start up), tahap pemanasan (warming up), tahap pembebanan (loading), dan tahap penghentian (stop).

## 1) Tahap Pengasutan Awal (Start Up)

Cara pengasutan mesin diesel genset dapat dilakukan dengan tiga sistem, yaitu pengasutan sistem manual, elektrik, dan kompresi.

### a. Sistem Pengasutan Manual

Cara untuk menghidupkan mesin diesel pada sistem ini adalah dengan menggunakan penggerak engkol pada poros engkol atau poros hubung yang akan digerakkan oleh tenaga manusia. Jadi sistem pengasutan ini sangat tergantung pada faktor manusia sebagai operasinya. Sistem ini biasanya digunakan untuk menjalankan mesin diesel dengan daya yang relatif kecil.

### b. Sistem Pengasutan Elektrik

Sistem ini menggunakan motor arus searah (DC) dengan suplai listrik dari baterai (accumulator) 12 atau 24 volt untuk mengasut mesin diesel. Saat pengasutan dilakukan motor DC mendapat suplai listrik dari baterai dan menghasilkan torsi yang timbul pada poros motor digunakan untuk menggerakkan mesin diesel sampai mencapai putaran tertentu. Baterai yang digunakan harus bisa dimanfaatkan untuk mengasut mesin beberapa kali tanpa harus diisi kembali. Pengisian ulang baterai dilakukan dengan menggunakan *battery charger*. Pada saat mesin diesel tidak bekerja maka *battery charger* mendapat pasokan listrik dari PLN, sedangkan pada saat mesin diesel bekerja maka pasokan untuk *battery charger* diperoleh dari generator set.

### c. Sistem Pengasutan Kompresi

Sistem pengasutan ini menggunakan motor dengan udara bertekanan tinggi untuk mengasut mesin diesel. Adapun

ara kerjanya adlah dengan menyimpan udara ke dalam suatu tabung udara. Kemudian udara tersebut dikompresikan sehingga menjadi udara panas dan bahan bakar dimasukkan ke dalam pompa injeksi bahan bakar serta disemprotkan lewat nozzle dengan tekanan tinggi. Proses ini mengakibatkan terjadinya pengkabutan dan pembakaran di ruang bakar. Pada saat tekanan di dalam tabung turun sampai batas minimum yang telah ditentukan, maka kompressor akan secara otomatis menaikkan tekanan udara di dalam tabung hingga tekanan dalam tabung mencukupi dan siap dipakai untuk melakukan pengasutan mesin diesel.

Berikut ini contoh langkah pengasutan mesin diesel genset :

- a. Masukkan semua MCB yang ada di panel kontrol mesin diesel ke posisi "ON"
- b. Masukkan Toggle Switch (TSW) ke atas "alarm normal".
- c. Putar kunci *starter* pada posisi "ON" dan akan terlihat lampu tekanan minyak pelumas, lampu suplai baterai "DC ON" dan lampu *Water High Level* menyala.
- d. Putar kunci stater pada posisi "START", setelah mesin diesel hidup, lepaskan pegangan tangan pada kunci, maka kunci akan kembali pada posisi "ON".
- e. Jangan lakukan penyalaan dengan cara mengoperasikan kunci stater terus menerus tanpa berhenti selama lebih dari 10 detik. Bila mesin belum hidup lakukan penyalaan berulang-ulang dalam jangka waktu sekitar 1 menit. Hal ini dilakukan untuk menjaga agar umur baterai tahan lama.
- f. Setelah mesin diesel hidup dan putarannya stabil pada 1500 rpm, maka lampu tekanan minyak pelumas akan mati dan lampu "*Radiator Fan Run*" akan menyala.

- g. Pastikan bahwa genset hidup tidak ada gangguan dan kipas Radiator sudah berputar.
- h. Masukkan MCCB yang berada di panel kontrol genset, maka lampu "CB ON" akan menyala dan lampu "G" juga menyala.

## 2) Tahap Pemanasan (Warming Up)

Setelah proses pengasutan selesai dilakukan biarkan mesin bekerja selama kurang lebih 10 menit dalam kondisi generator tidak dibebani, langkah ini dilakukan untuk pemanasan (warming up) dengan tujuan pelumasan pada bagian-bagian mesin dapat berlangsung dengan baik.

## 3) Tahap Pembebanan (Loading)

Setelah tahap pemanasan selesai dilakukan maka genset dapat dibebani. Selama genset dioperasikan pastikan bahwa tidak terdapat suara-suara yang tidak normal dan getaran yang besar, warna gas buang normal tidak terlalu pekat atau keputihan. Selanjutnya periksa semua meter dan indikator menunjukkan normal, meter dan indikator yang perlu diamati adalah :

- Tachometer
- Indikator tekanan minyak
- Indikator/Meter suhu air pendingin
- Ammeter berada pada (+)
- Indikator/Meter suhu minyak pelumas
- Filter minyak alarm tidak menyala.

## 4) Tahap Penghentian

Langkah yang harus diperhatikan saat menghentikan/mematikan genset yaitu janganlah menghentikan/mematikan genset secara mendadak dalam kondisi beban penuh, kurangilah beban secara bertahap hingga genset beroperasi tanpa beban. Biarkanlah genset hidup

tanpa beban beberapa saat, agar susut yang tinggi karena adanya beban berangsur turun secara perlahan lahan. Hal ini juga mengurangi regangan pada konstruksi mesin diesel karena adanya beban dan panas.

#### 5.10.3.4 Mengamati dan Menanggulangi Masalah Operasi

Apabila genset saat dioperasikan timbul gangguan atau masalah maka lakukan segera langkah-langkah untuk mengatasinya sesuai dengan SOP yang berlaku. Adapun hal-hal yang harus diperhatikan diantaranya adalah:

- 1) Mengidentifikasi dan menanggulangi masalah operasi sesuai dengan kriteria unjuk kerja yang mencakup gangguan yang berkaitan dengan penyimpangan penunjukan alat ukur (arus, tekanan, suhu, dll) diidentifikasi dengan memperhatikan toleransi yang ditetapkan sesuai dengan *instruction manual*, penyimpangan yang teridentifikasi dianalisa penyebabnya dan ditetapkan alternatif penanggulangan; masalahnya dikonsultasikan kepada pihak yang terkait dengan memperhatikan spesifikasi standar yang berlaku dan penanggulangan masalah yang telah disetujui; diterapkan sehingga gangguan teratasi.
- 2) Membuat laporan gangguan dengan kriteria unjuk kerja yang mencakup laporan dan dibuat dengan format dan prosedur yang ditetapkan oleh institusi/lembaga.

Tabel 5.9 memperlihatkan contoh pelacakan gangguan pada genset dan langkah perbaikan yang perlu dilakukan untuk mengatasinya.

#### 5.10.3.5 Membuat Laporan Pengoperasian

Pada saat mesin diesel dioperasikan harus dilakukan pemantauan yang teliti sehingga terjadinya kerusakan saat mesin dioperasikan dapat dihindari, yang bisa mengakibatkan pada ketidaksiapan mesin untuk beroperasi. Hal-hal yang harus tercatat dalam laporan operasi adalah sebagai berikut:

- 1) Lama pengoperasian;
- 2) Banyaknya minyak pelumas, bahan bakar dan air pendingin yang ditambahkan;
- 3) Penggantian minyak pelumas dan air pendingin;
- 4) Tekanan minyak pelumas, temperatur gas buang (exhaust) dan temperatur suhu udara masuk;
- 5) Bagian-bagian yang diganti, jenis perbaikan yang dilakukan dan hasil perbaikan;
- 6) Unjuk kerja selama mesin dioperasikan seperti "Putaran mesin tidak stabil" dan lain-lain.

Hasil pemantauan oleh operator harus dilaporkan kepada pengawas operasi untuk dilakukan evaluasi.

Tabel 5.9 Pelacakan Gangguan pada Genset

Jenis Gangguan	Diagnosa	Perbaikan
Mesin tidak bisa berputar	Tidak ada tenaga putar pada motor starter	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Periksa amper baterai</li> <li>➤ Periksa mesin diesel</li> </ul>
Mesin hidup kemudian berhenti lagi	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Solar habis</li> <li>2. Sistem injeksi</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Periksa level bahan bakar</li> <li>➤ Buka kran bahan bakar</li> <li>➤ Pompa bahan bakar sampai udara keluar</li> </ul>
Mesin berputar tidak normal	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Filter bahan bakar kotor</li> <li>2. Saluran bahan bakar tersumbat</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ganti filter bahan bakar</li> <li>➤ Periksa saluran dan pompa keluar</li> </ul>
Mesin berputar sangat cepat	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Throttle</i> terlalu membuka</li> <li>2. Beban turun drastis</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Longgarkan bukaan <i>throttle</i></li> <li>➤ Periksa Governor</li> <li>➤ Periksa Voltmeter &amp; Amperemeter</li> </ul>
Mesin berhenti secara tiba-tiba	Mesin mengalami beban lebih	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Periksa sistem pendinginan</li> <li>➤ Periksa Circuit Breaker</li> <li>➤ Kurangi Beban listriknya</li> </ul>
Mesin tenaganya hilang	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Saluran udara tertutup</li> <li>2. Gas buang menekan masuk</li> <li>3. Kompresi hilang</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Periksa sistem saluran udara masuk</li> <li>➤ Periksa sistem pembuangan gas buang</li> <li>➤ Periksa dan test kompresi</li> <li>➤ Periksa kedudukan klep dan ring torak</li> </ul>
Gas buang hitam	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ada pelumas terbakar</li> <li>2. Injektor bahan bakar kotor</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Periksa level pelumas Crankcase</li> <li>➤ Periksa ring torak</li> <li>➤ Periksa dinding mesin dan seal</li> <li>➤ Bongkar dan bersihkan injektor</li> </ul>
Suara Mesin berisik	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ada asoseris mesin yang longgar/lepas</li> <li>2. Katup longgar</li> <li>3. Bearing longgar</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Periksa semua baut dan dudukan mesin</li> <li>➤ Periksa jarak katup</li> <li>➤ Periksa hubungan Poros dan bearing crankshaft</li> </ul>
Tegangan hilang	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Gangguan AVR</li> <li>2. Belitan hubung singkat</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Periksa komponen pada AVR</li> <li>➤ Periksa belitan dengan Megger</li> </ul>

## 5.11 Memperbaiki Motor Listrik

### 5.11.1 Pendahuluan

Salah satu tujuan perawatan dan perbaikan adalah agar peralatan mencapai umur maksimum daripada mengganti dengan yang baru. Namun hal ini tidak dapat diberlakukan secara umum tergantung dari macam dan jenis serta teknologi dari peralatan tersebut.

Untuk mencapai tujuan tersebut, suatu kebijakan perawatan dan perbaikan harus diarahkan pada efisiensi dan efektifitas kerja, tidak bersifat reaktif (bertindak apabila peralatan mengalami kerusakan) melainkan harus bersifat proaktif (bertindak/merencanakan suatu tindakan sebelum peralatan rusak atau tidak dapat melaksanakan fungsinya sama sekali).

Tindakan perbaikan merupakan konsekuensi logis dari usaha perawatan dan perbaikan dikategorikan menjadi :

- Perbaikan darurat (Perbaikan tak terencana)
- Perbaikan berdasarkan permintaan
- *Trouble Shooting (Breakdown)*
- Penggantian sebagian
- Penghapusan

#### 1) Perbaikan Darurat

Perbaikan darurat artinya perbaikan yang harus segera dilaksanakan untuk mencegah akibat yang lebih berat dan parah, atau kerusakan yang bisa mengakibatkan kecelakaan pada pemakai dan menyebabkan kerusakan lebih besar pada peralatan.

#### 2) Perbaikan Berdasarkan permintaan

Perbaikan yang dilakukan terhadap peralatan yang tidak bekerja dengan normal. Peralatan tersebut biasanya masih bisa digunakan, tetapi tidak dapat dioperasikan. Usaha perbaikan yang dilakukan akan meningkatkan kembali daya guna peralatan.

#### 3) Trouble Shooting (Breakdown)

Prinsipnya hampir sama dengan perbaikan berdasarkan permintaan, yaitu kerusakan terjadi tanpa terduga. *Trouble shooting* juga bertujuan untuk meningkatkan daya guna peralatan, yang berbeda adalah waktu perbaikan. Kalau perbaikan berdasarkan permintaan adalah perbaikan yang hanya akan dilaksanakan setelah ada permintaan untuk itu, sedangkan *trouble shooting* adalah perbaikan yang tidak boleh ditunda dan segera dilakukan pada saat terjadinya *breakdown* (kerusakan). Dengan kata lain *trouble shooting* itu adalah perbaikan darurat.

#### 4) Penggantian Sebagian

Dilakukan apabila sukucadang yang rusak tidak dapat diperbaiki lagi sehingga bagian tersebut harus diganti dengan yang baru, atau bila biaya perbaikan lebih tinggi dari pada biaya penggantian. Atau penggantian sukucadang yang dilakukan secara berkala, misalnya penggantian oli mesin, penggantian *bearing*, penggantian terminal dan lain-lain.

#### 5) Penghapusan

Memindahkan peralatan yang rusak dari tempat kerja. Penghapusan dilakukan melalui pertimbangan matang, dan setelah segala usaha-usaha perawatan

tidak mungkin lagi dapat memperbaiki peralatan tersebut, atau bila peralatan tersebut telah mencapai batas usia pakainya.

### 5.11.2 Perbaikan Dasar Motor Induksi

Konstruksi motor induksi relatif sederhana bila dibandingkan dengan motor arus searah atau motor sinkron, sehingga prosedur pemeliharaannya tidak terlalu sulit. Apabila dirawat dengan baik dan rutin motor induksi bisa dipergunakan bertahun-tahun.

Walaupun demikian tidak menutup kemungkinan meskipun telah dilakukan perawatan secara rutin, gangguan atau kerusakan masih mungkin terjadi, baik kata faktor usia, hubung singkat pada lilitan, dan sebagainya.

Gangguan/kerusakan pada motor induksi hampir sama dengan gangguan mesin-mesin listrik lainnya, ialah gangguan elektrik dan mekanis, seperti:

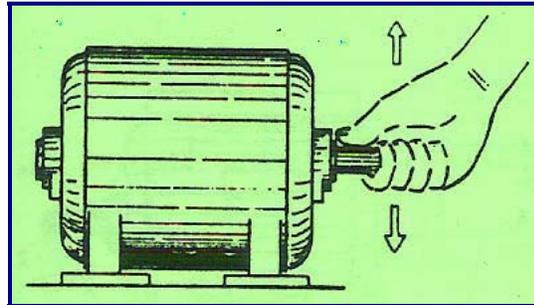
- Kumputan stator terhubung singkat dengan rangka;
- Kumputan stator terhubung singkat satu dengan lainnya;
- Kumputan stator terputus;
- Hubungan dari kumputan stator ke terminal terputus;
- Bantalan aus;
- Poros motor tidak lurus.

Untuk menentukan jenis kerusakan yang terjadi pada motor induksi tiga fasa dapat dilakukan dengan langkah sebagai berikut :

1. Putar poros motor dengan menggunakan tangan, lalu rasakan apakah ringan atau berat. Kalau terasa berat

kemungkinan ada kerusakan pada bantalan atau adanya gesekan antara bagian rotor dengan stator;

2. Kalau poros dapat diputar secara normal (tidak berat), kemungkinan kerusakan ada pada terminal motor atau belitan stator.



Gambar 5.179 Menguji Poros Motor

#### 5.11.2.1 Memeriksa Kumputan Stator Motor

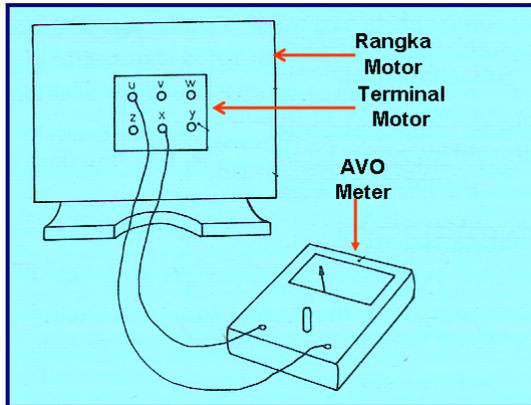
Untuk memeriksa belitan stator motor, peralatan yang dibutuhkan adalah :

- Satu buah AVO meter
- Satu buah Megger  $\pm$  500 s.d 1000 V
- Satu buah kunci pas
- Satu buah palu
- Sebilah kayu
- Treker ( Ulir Penarik)

Adapun langkah pengukurannya adalah:

1. Periksa terlebih dahulu apakah ada kawat dari terminal motor ke bagian dalam motor yang terputus;
2. Selanjutnya periksa, untuk mengetahui apakah ada kawat antar fasa yang terhubung;
3. Bila berdasarkan hasil pengamatan pada langkah (1) dan (2) tidak ada kawat yang putus atau hubung singkat, maka lanjutnya dengan langkah (4);
4. Gunakan AVO meter untuk menguji apakah ada kumputan yang putus

atau terjadi hubung singkat antar belitan stator. Dalam keadaan baik, nilai resistansi antar kumparan hampir sama.



Gambar 5.180 Pengujian Belitan Stator Dengan AVO Meter

Periksa nilai resistansi antara terminal:

U ↔ X = ..... Ohm

V ↔ Y = ..... Ohm

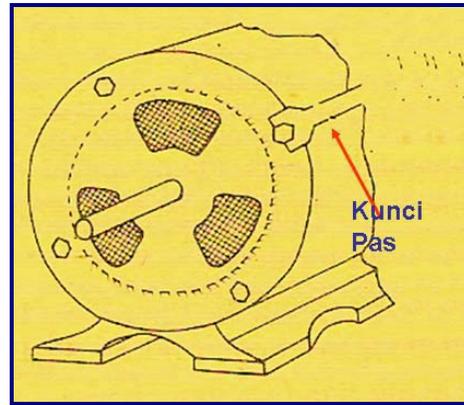
W ↔ Z = ..... Ohm

Bila nilai tahanannya tidak sama, maka ada beberapa kemungkinan:

- Nilai resistansi antar ujung kumparan yang sama mendekati tak terhingga, kemungkinan ada belitan putus.
- Nilai resistansi tidak sama, kemungkinan terjadi hubung singkat antar kumparan atau dari kumparan ke rangka motor.

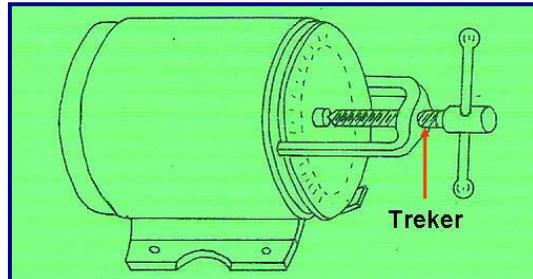
Selanjutnya bila berdasarkan pengujian ada indikasi kumparan putus atau hubung singkat, maka lakukan pembongkaran motor untuk mengetahui kondisi bagian dalam dari belitan stator. Berikut ini langkah-langkah untuk membongkar motor dan menguji bagian dalam belitan stator.

1. Lepaskan mur-mur yang ada pada bagian penutup rangka motor dengan menggunakan kunci pas;

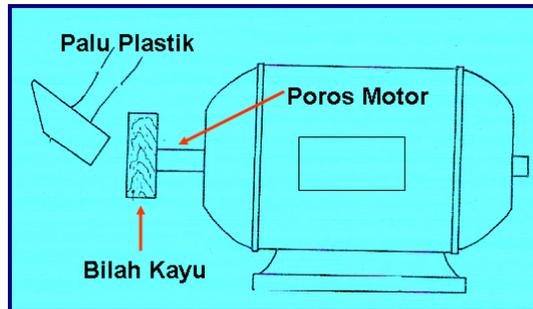


Gambar 5.181 Melepas Mur Tutup Rangka Motor

2. Bila mur-mur sudah dilepas semuanya, gunakan treker (penarik ulir) untuk melepas rotor dari rangka motor, alternatif lain gunakan palu dan bilah kayu untuk mendorong penutup motor dari rangka, dengan cara memukul poros motor secara perlahan-lahan.

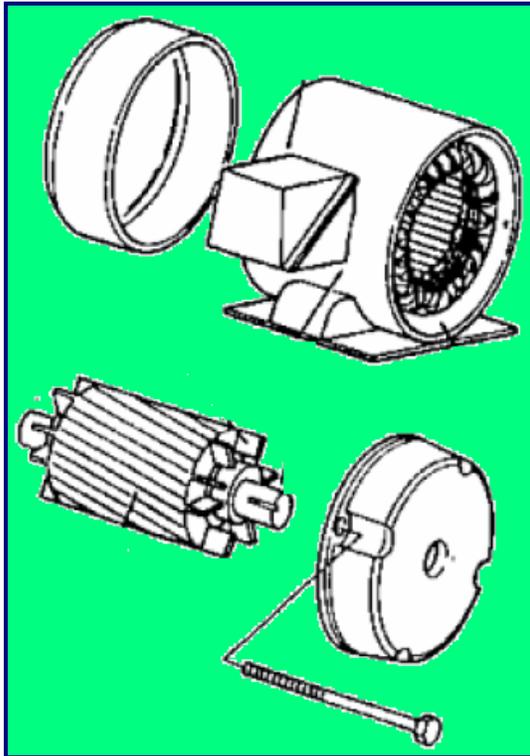


Gambar 5.182 Melepas Penutup Motor dengan Treker



Gambar 5.183 Melepas Penutup Motor dengan Palu

- Setelah terbuka lepas bagian rotor dari rangka motornya.

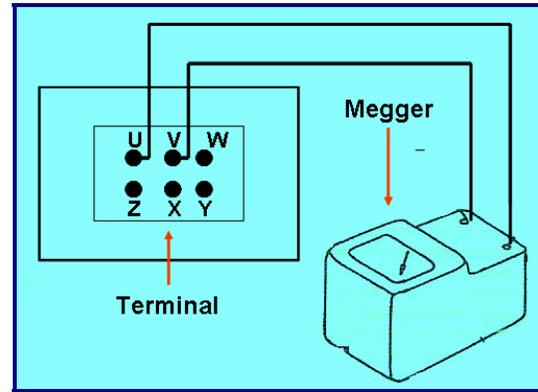


Gambar 5.184 Memisahkan Bagian Rotor dari Rangka Motor

- Selanjutnya dengan menggunakan *Megger* atau *Insulation Tester* ukur resistansi isolasi antar belitan fasa dan antara masing-masing belitan dengan rangka motor.

Nilai resistansi isolasi belitan yang baik, minimum sebesar 1KOhm/Volt, jadi kalau tegangan kerja motor 220 Volt, maka resistansi isolasinya harus 220 KOhm. Bila resistansi isolasinya kurang dari 220 KOhm, maka perlu dilakukan pemeriksaan lebih lanjut.

Perhatikan apakah ada kawat yang terkelupas atau cacat, kalau kerusakan isolasinya tidak terlalu serius, perbaikan dapat dilakukan dengan cara memberi vernish lagi pada permukaan belitan.



Gambar 5.185 Pemeriksaan Belitan Stator dengan Megger

### 5.11.3 Membongkar Kumparan Motor

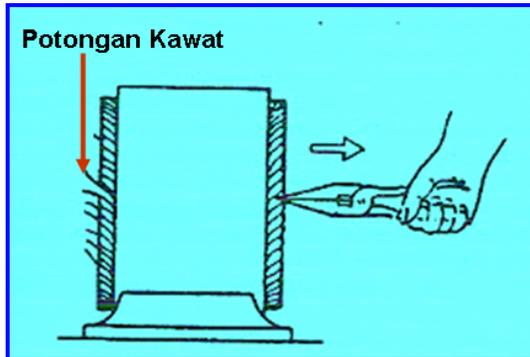
Apabila sesudah dilakukan pengukuran ternyata kumparan sudah rusak, maka cara yang paling baik adalah mengganti kumparan stator dengan yang baru.

Sebelum melakukan pembongkaran lakukan pemeriksaan dan catat data-data yang berkaitan dengan langkah pembentukan kumparan, seperti :

- Jumlah grup kumparan;
- Setiap kumparan terdiri dari berapa koil;
- Berapa jumlah koil pada tiap kumparan dan jumlah lilitan pada tiap alur;
- Bagaimana bentuk sambungan antar kumparan;
- Bagaimana langkah koil dan bentuk kumparannya;
- Lakukan pengukuran diameter kawat;
- Berapa tegangan kerja motor;
- Hitung jumlah alur, bila perlu buat gambar bentangan dari kumparan.

Bila proses pencatatan data telah dilakukan baru laksanakan pembongkaran kumparan motor. Cara membongkar kumparan motor adalah sebagai berikut:

1. Potong semua kawat pada masing-masing kumparan sampai kedekat inti/kern motor dengan menggunakan tang pemotong ;



Gambar 5.186 Pemotongan Kawat Kumparan

2. Apabila semua kawat pada masing kumparan telah dipotong, lalu tarik kawat dari sisi yang berlawanan dengan menggunakan tang penjepit seperti diperlihatkan pada gambar 5.186;
3. Sesudah semua kawat selesai dilepas, selanjutnya bersihkan semua alur dari bekas potongan kawat atau kotoran lainnya;
4. Amati semua alur dan inti motor secara seksama, kalau ada yang rusak atau renggang lakukan perbaikan. Apabila alur atau inti motor rusak, maka motor tidak akan beroperasi secara baik, misalnya kerugian pada inti jadi naik atau suara motor saat beroperasi jadi mendengung.

## 5.11.4 Pelilitan Kumparan Motor

### 5.11.4.1 Menentukan Langkah Melilit Kumparan

Sebelum melaksanakan pelilitan kumparan pada alur motor, maka terlebih dahulu harus dilakukan perhitungan dengan jumlah alur, jumlah kutub, dan luas penampang kawat yang akan dipergunakan.

- Jarak Alur dalam derajat listrik
 
$$= \frac{360^0}{\text{Jml\_Alur}} \times \text{Pasang\_Kutub}$$

pada sistem tiga fasa antar fasa U ke V , V ke W, dan W ke U harus berbeda 120 derajat .

- Jumlah alur pada tiap fasa
 
$$= \frac{\text{Jml\_Alur}(G)}{\text{Jml\_Fasa}}$$

- Jumlah alur tiap fasa tiap kutub
 
$$= \frac{\text{Jml\_Alur / Fasa}}{\text{Jml\_Kutub}}$$

- Jumlah koil tiap kumparan
 
$$= \frac{\text{Jml\_Alur}}{\text{Jml\_Kutub} \times \text{Jml\_Fasa}}$$

#### ❖ Penyambungan antara Kumparan

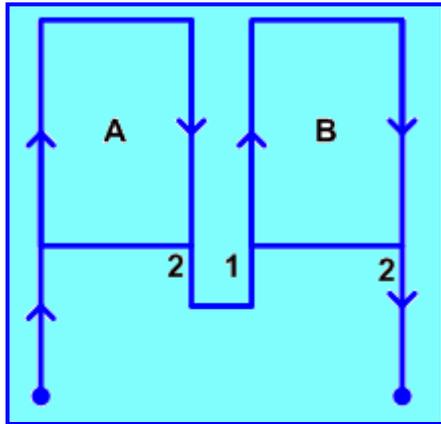
Untuk melakukan penyambungan antara kumparan dapat dilakukan berdasarkan arah polaritas arusnya. Setiap kumparan mempunyai dua ujung kawat, dengan arah polaritas arus masuk dan keluar. Sebagai contoh apabila kita mempunyai dua buah kumparan A dan B yang akan dibentuk menjadi empat buah kutub maka yang harus dilakukan adalah menyambung ujung A.2 dengan B.1 seperti untuk hubungan seri dan A.1 dengan B.1 untuk hubungan paralel seperti diperlihatkan pada gambar 5.187

#### ❖ Kawat Kumparan

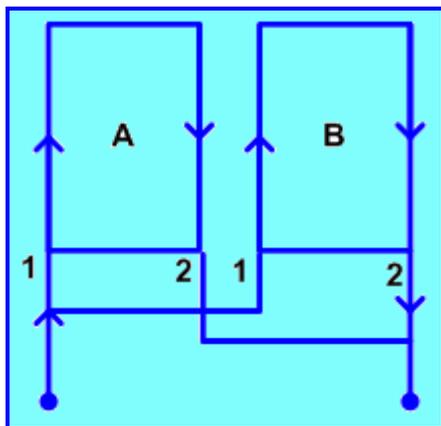
Jenis kawat yang biasa digunakan pada kumparan motor adalah kawat yang terbuat dari tembaga karena bahan tembaga mempunyai tahanan jenis lebih kecil

bila dibandingkan dengan kawat aluminium dan dari segi pengerjaannya juga lebih mudah.

0,05 mm	0,30 mm	0,55 mm
0,10 mm	0,35 mm	0,60 mm
0,15 mm	0,40 mm	0,65 mm
0,20 mm	0,45 mm	0,70 mm
0,25 mm	0,50 mm	dst



a. Hubungan Seri



b. Hubungan Paralel

Gambar 5.187 Hubungan Kumparan

Bentuk kawat ada dua macam yaitu berbentuk persegi panjang dan bulat. Kawat dengan bentuk bulat banyak digunakan pada motor dengan daya kecil dengan tegangan kerja rendah, sedangkan kawat bentuk persegi panjang digunakan untuk motor daya besar dengan tegangan kerja menengah.

Kawat yang digunakan untuk kumparan mempunyai standar ukuran berdasarkan diameternya, seperti contoh berikut ini :

Berdasarkan diameter bisa ditentukan luas penampang kawatnya berdasarkan rumus :

$$q = \frac{1}{4} \pi \cdot d^2 \text{ mm}^2$$

Berikut ini contoh untuk membuat bentangan kumparan dari sebuah motor induksi tiga fasa :

Sebuah motor induksi tiga fasa, 4 kutub mempunyai jumlah alur 36 buah. Buat gambar bentangan kumparannya dengan hubungan seri berdasarkan hasil perhitungan.

Jawab :

➤ Jarak Alur dalam derajat listrik

$$= \frac{360^0}{36} \times 2 = 20^0$$

➤ Jumlah alur pada tiap fasa

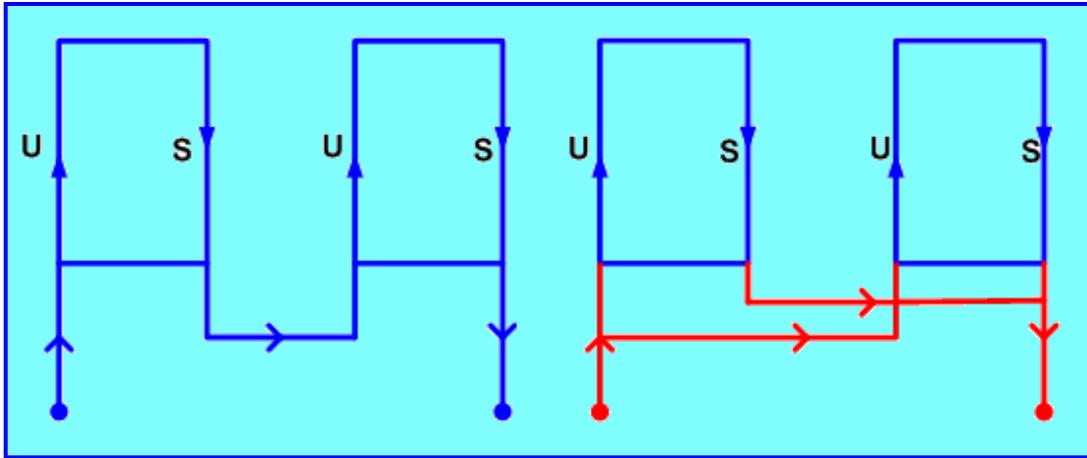
$$= \frac{36}{3} = 12 \text{ alur}$$

➤ Jumlah alur tiap fasa tiap kutub

$$= \frac{36/3}{4} = 3 \text{ alur}$$

Berdasarkan perhitungan diatas setiap kutub akan dibentuk oleh 3 (tiga) buah alur, setiap kumparan terdiri dari 6 (enam) alur, dan setiap fasa mempunyai 2 (dua) kumparan.

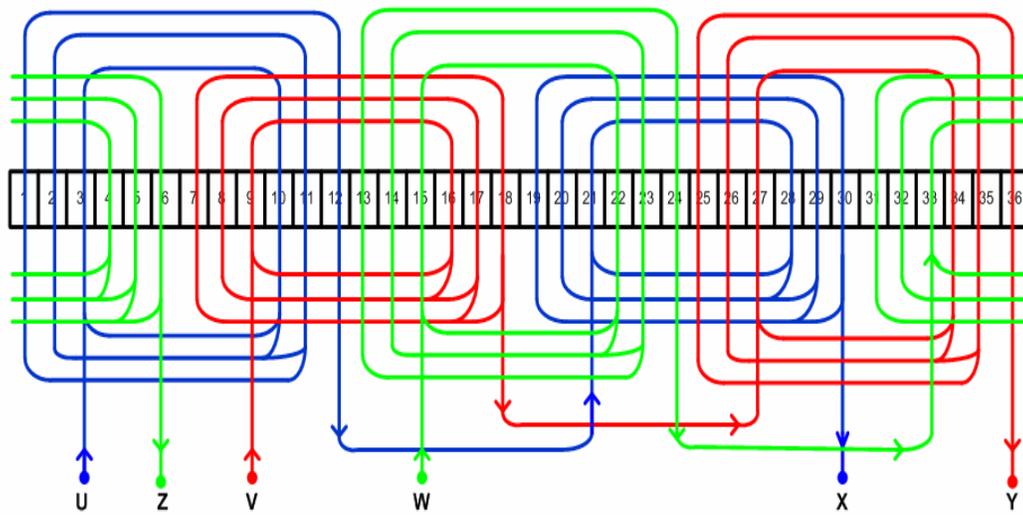
Untuk membentuk 4 (empat) buah kutub pada setiap fasanya, maka dapat dilakukan hubungan kumparan seperti terlihat pada gambar 5.188 dan bentangan kumparan secara lengkapnya ditunjukkan pada gambar 5.189.



a. Hubungan Seri

b. Hubungan Paralel

Gambar 5.188 Hubungan Kumbaran 4 (Empat) Kutub

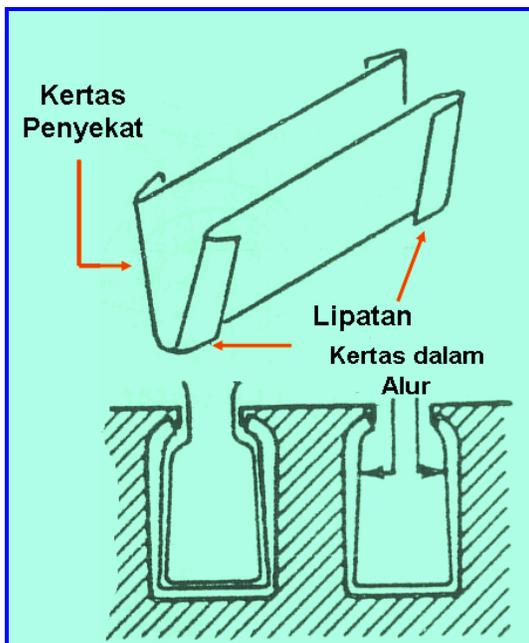


Gambar 5.189 Bentangan Kumbaran Motor Induksi 3 Fasa, 4 Kutub

#### 5.11.4.2 Penyekatan Alur Stator

Sebelum melilitkan kumparan pada alur stator motor, alur terlebih dahulu harus diberi kertas penyekat yang berfungsi sebagai isolasi antara kawat dengan permukaan alur.

Ukur panjang alur dan dalamnya alur, sebelum kertas dipotong untuk panjangnya tambahkan  $\pm 1\text{cm}$ , tujuannya untuk dilipat pada kedua ujung stator, sehingga saat kawat ditekuk tidak mengenai inti stator.



Gambar 5.190 Penyekatan Alur

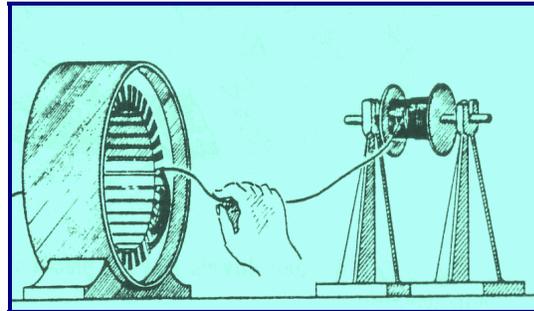
#### 5.11.4.3 Membuat Cetakan Kumparan

Untuk membuat cetakan kumparan sebuah motor dapat dilakukan dengan cara :

- Langsung
- Menggunakan mal
- Lilitan Pintal

#### 1) Melilit Kumparan Secara Langsung

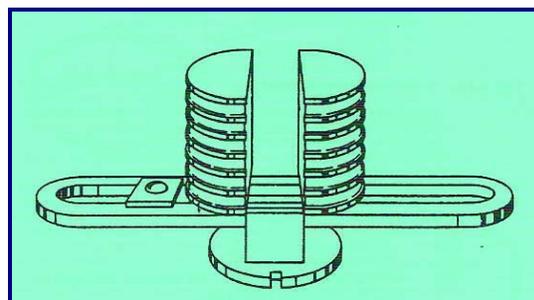
Keuntungan proses melilit secara langsung adalah tidak ada sambungan diantara kumparan, melilit dimulai dari ukuran kumparan yang paling kecil ke kumparan yang paling besar.



Gambar 5.191 Melilit Kumparan Langsung

#### 2) Melilit Kumparan Menggunakan Mal

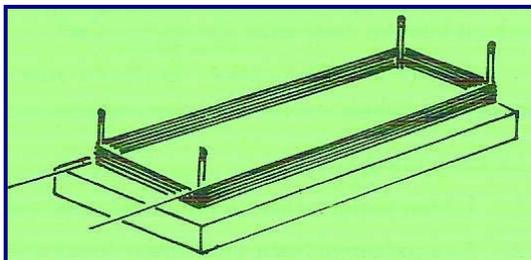
Untuk melilit kumparan dengan menggunakan mal ukur panjang dan lebar kumparan yang akan dililit, selanjutnya siapkan mal sesuai dengan ukuran. Dengan menggunakan mal buat lilitan dengan jumlah lilitan dan luas penampang kawat sesuai dengan hasil perhitungan. Setelah selesai, ikat kumparan dengan menggunakan tali, kemudian lepaskan dari malnya untuk dimasukkan ke dalam alur motor.



Gambar 5.192 Contoh Mal untuk Melilit Kumparan

### 3) Melilit Kumparan Cara Lilitan Pintal

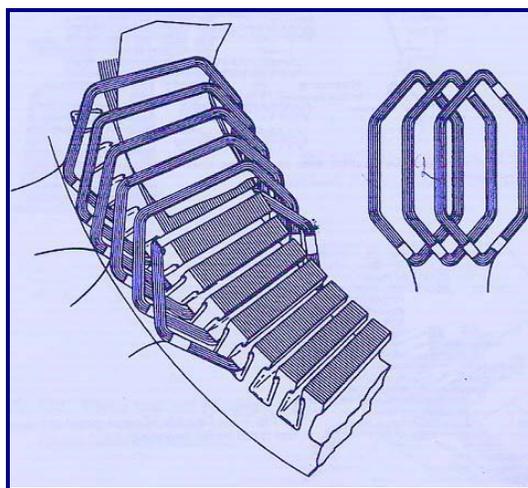
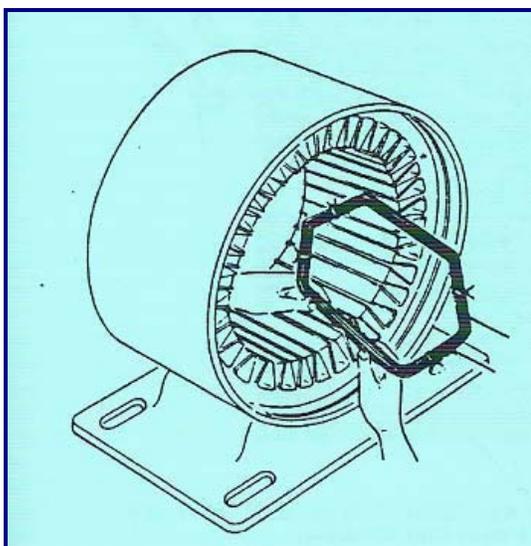
Gambar 5.193 memperlihatkan cara melilit kumparan dengan cara lilitan pintal, pada dasarnya cara ini hampir sama dengan menggunakan mal.



Gambar 5.193 Cara Lilitan Pintal

#### 5.11.4.4 Memasang Kumparan Pada Alur

Setelah kumparan jadi, tahap selanjutnya adalah memasukkan kumparan-kumparan tersebut kedalam alur. Proses ini harus dilakukan secara hati-hati jangan sampai isolasi kawat terkelupas/ tergores yang bisa mengakibatkan terjadinya hubung singkat antar kumparan atau kumparan ke inti.



Gambar 5.194 Memasang Kumparan pada Alur.

Lakukan secara bertahap, bila satu kumparan sudah dimasukkan kedalam alur, rapihkan ujung-ujungnya untuk memudahkan melakukan hubungan antar kumparan. Gambar 5.194 memperlihatkan cara memasang kumparan kedalam alur.

#### 5.11.4.5 Menyambung Ujung Kumparan

Masing-masing ujung kumparan harus disambungkan seperti yang telah dibuat pada gambar bentangan. Saat melakukan penyambungan perhatikan pemasangan kumparan pada tiap-tiap fasa, jangan sampai tertukar. Baru lakukan penyambungan sebaik mungkin supaya tidak mudah putus, sebelum disambung ujung-ujungnya diberi selongsong dan bersihkan emailnya baru di solder.

Selanjutnya pasang kertas isolasi diantara grup kumparan, kumparan yang tidak ada ujungnya harus diikat dan dirapikan supaya terlihat rapi dan tidak tergores oleh penutup rangka motor.

Bila seluruh kumparan telah dimasukan kedalam alur lakukan pemeriksaan :

- Periksa resistansi kumparan, apakah resistansi pada setiap fasa sudah sama;
- Periksa resistansi isolasi, baik antar fasa maupun dari masing-masing fasa ke rangka motor;
- Yakinkan semua kumparan sudah rapih, jangan ada bagian yang menonjol sehingga bisa tergores oleh rotor.

#### 5.11.4.6 Memberi Lak Isolasi

Setelah langkah pemeriksaan selesai dilakukan, langkah selanjutnya adalah memberi lak isolasi. Bagian-bagian yang perlu diberi isolasi adalah semua alur tempat kumparan diletakan dan kepala-kepala kumparan. Pemberian lak isolasi dilakukan dengan cara menuangkan cairan isolasi ke dalam alur-alur sampai penuh dan kemudian dikeringkan.

Untuk mengeringkan lak isolasi dapat dilakukan dengan beberapa cara, seperti

- Menggunakan tungku pemanas
- Dijemur dengan panas matahari
- Menggunakan panas lampu pijar.

Lakukan pemanasan secukupnya, bila telah kering bersihkan bagian stator yang kena isolasi dengan obeng atau pisau, sehingga rotor motor bisa dimasukan dengan mudah

#### 5.11.4.7 Merakit Motor

Setelah proses pemberian isolasi dan pengeringan selesai dilakukan, sekali lagi lakukan pengukuran resistansi pada masing-masing kumparan dan pengukuran resistansi isolasi, bila hasilnya

sudah baik maka langkah perakitan motor bisa dilakukan.

Langkah perakitan kembali adalah sebagai berikut :

- 1) Masukan rotor secara hati-hati kedalam rangka motor;
- 2) Pasang tutup motor sesuai dengan kedudukan semula,;
- 3) Pasangkan baut penguat pada bagian depan menutup motor, lalu kuatkan dengan menggunakan kunci pas.
- 4) Coba putar kembali poros motor dengan menggunakan tangan,yakinkan tidak ada yang mengganggu gerakan poros.

#### 5.11.4.8 Pemeriksaan Akhir

Setelah selesai dirakit, lakukan kembali pengukuran resistansi pada masing-masing kumparan dan pengukuran resistansi isolasi, bila sudah baik coba hubungkan terminal motor dengan suplai tegangan yang ada.

Pada saat menguji dengan sumber tegangan, jangan lupa catat nilai :

- Tegangan (Volt)
- Arus (A)
- Putaran (Rpm)

#### 5.11.5 Laporan Pelaksanaan Pekerjaan

Setelah pekerjaan perbaikan motor selesai dilakukan, maka buat laporan pelaksanaan pekerjaan sesuai dengan format yang berlaku pada institusi/perusahaan. Isi laporan merupakan rangkuman dari seluruh proses perbaikan motor listrik, dari mulai pemeriksaan awal sampai dengan pemeriksaan akhir.

# 6. PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER

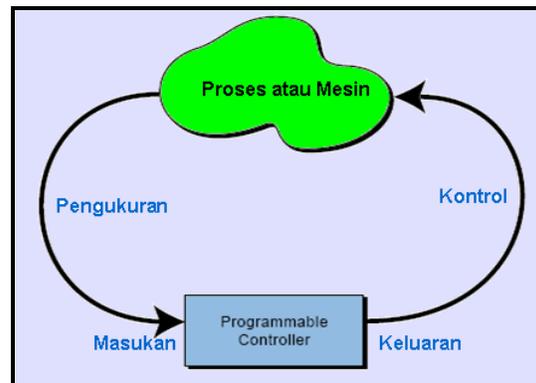
## 6.1 Pendahuluan

Sebelum otomatisasi industri berkembang, proses industri menggunakan mesin-mesin yang dikontrol secara langsung oleh pekerja-pekerja dan melibatkan berbagai komponen mekanik. Sistem kontrol kemudian beralih ke sistem yang menggantikan sebagian atau seluruh tugas operator. Sejumlah elemen mekanik atau listrik dihubungkan membentuk sistem kontrol yang berfungsi permanen (*hardwired control*). Sistem kontrol *hardwired* yang umum digunakan di industri antara lain sistem kontrol logika relai, elektronik, pneumatik, hidrolis, dan elektronik analog.

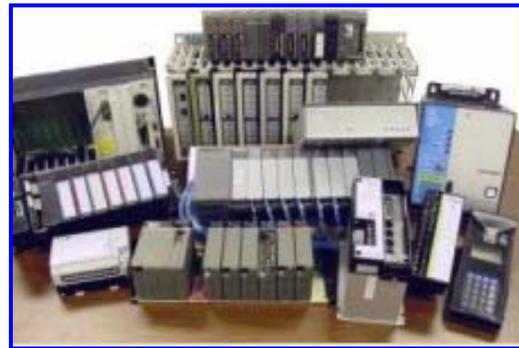
Kompleksitas sambungan antara elemen pembentuk sistem kontrol sangat tergantung pada kompleksitas proses pada suatu industri. Pada sistem kontrol kompleks, modifikasi sambungan dan konfigurasi elemen maupun “*troubleshooting*” pada kegagalan sistem kontrol sangat sulit dilakukan.

Perkembangan komponen mikroelektronika, terutama yang bersifat dapat diprogram, menghasilkan sistem kontrol elektronik yang sangat fleksibel (*programmable control*). Sistem kontrol *programmable* yang pertama sekali digunakan sebagai pengganti sistem kontrol berbasis logika relai adalah *Programmable Logic Controller* (PLC).

Definisi PLC menurut *National Electrical Manufactures Association (NEMA)* adalah “suatu alat elektronika digital yang menggunakan memori yang dapat diprogram untuk menyimpan instruksi-instruksi dari suatu fungsi tertentu seperti logika, sekuensial, pewaktuan,



Gambar 6.1 Ilustrasi Konseptual Aplikasi PLC



Gambar 6.2 Contoh PLC

pencacahan dan aritmatika untuk mengendalikan mesin dari proses.”

Sehingga operasi PLC terdiri dari evaluasi masukan dari proses industri, memproses masukan sesuai dengan program yang ada di memorinya, dan menghasilkan keluaran untuk menggerakkan peralatan-peralatan proses. PLC secara langsung dapat dihubungkan ke aktuator dan transduser dalam proses industri, karena berbagai jenis antarmuka standar terdapat pada PLC.

## 6.1.1 Sejarah Perkembangan PLC

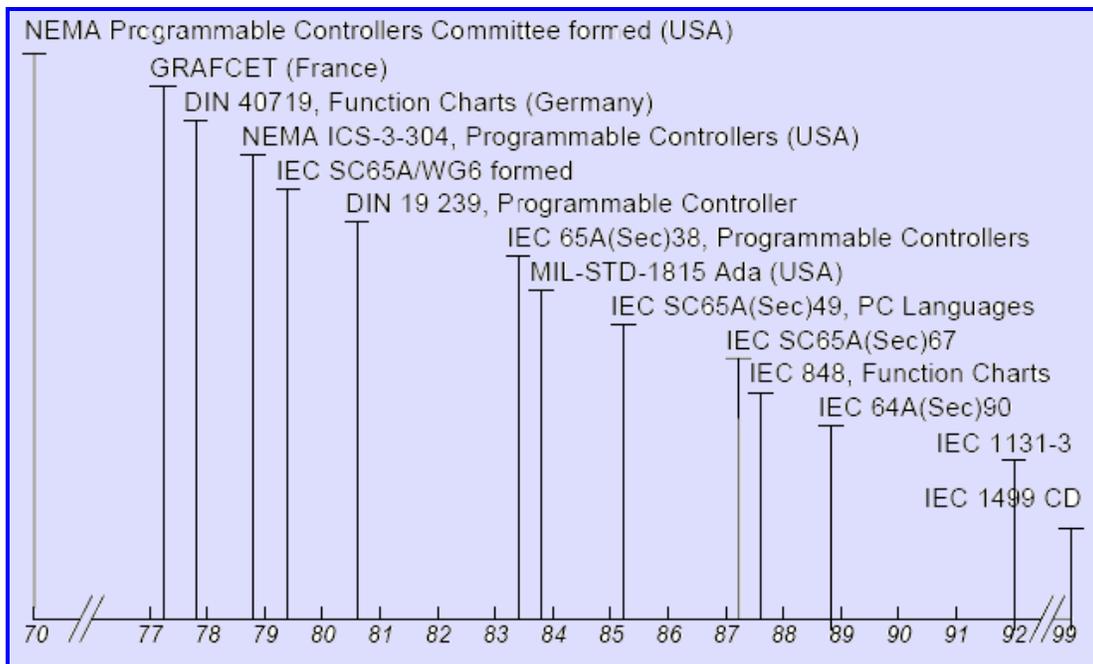
Pada tahun 1960, perlunya pengurangan biaya proses produksi dan pemeliharaan peralatan sistem kontrol berbasis relai elektromekanik di industri Amerika telah mendorong lahirnya PLC. PLC MODICON (Modular Digital Controller) merupakan jenis pertama PLC yang dipergunakan pada proses produksi untuk tujuan komersial.

Dalam waktu singkat programmable controller (pengontrol terprogram) mulai digunakan secara meluas di industri. Di tahun 1971, PLC telah banyak menggantikan sistem kontrol relai, yang merupakan langkah awal menuju otomasi kontrol di industri lainnya, seperti industri makanan dan minuman, pabrik baja, pabrik pembuat kertas, dan lain sebagainya.

Pada tahun 1973, perkembangan PLC di tandai dengan munculnya PLC Modbus yaitu PLC yang mempunyai kemampuan berkomunikasi dengan PLC lainnya dan bisa diletakan lebih jauh dari lokasi mesin yang akan dikontrol.

Selanjutnya pada tahun 1980 an mulai digagas standardisasi komunikasi dengan protokol otomasi pabrik milik General Motor. Ukuran PLC diperkecil dan pemrograman PLC dengan perangkat lunak melalui *Personal Computer* mulai diperkenalkan.

Tahun 1990-an dilakukan reduksi protokol baru dan modernisasi lapisan fisik dari protokol-protokol populer yang telah digunakan sejak tahun 1980 an. IEC berusaha untuk menggabungkan bahasa pemrograman PLC dibawah satu Standar Internasional. Gambar 6.3 memperlihatkan perkembangan standardisasi bahasa pemrograman PLC.



Gambar 6.3 Standardisasi Bahasa Pemrograman PLC

Saat ini banyak pengembangan teknologi di industri pengontrol terprogram. Pengembangan ini tidak hanya menyangkut rancangan pengontrol terprogram, tetapi juga pendekatan filosofis arsitektur sistem kontrol. Perubahan meliputi perangkat keras dan perangkat lunak PLC.

Sehingga sebuah PLC mempunyai operasi program yang lebih cepat, ukuran lebih kecil dengan harga lebih murah, jumlah masukan-keluaran yang lebih banyak, perangkat antarmuka khusus yang memungkinkan piranti dihubungkan langsung ke pengendali, dan sistem komunikasi dengan perangkat lain.

Dimasa mendatang produsen pengontrol terprogram tidak hanya mengembangkan produk baru saja, tetapi juga akan mengintegrasikan PLC dengan peralatan kontrol dan manajemen pabrik. PLC akan terhubung pada sistem jaringan melalui computer-integrated manufacturing (CIM) systems, mengkombinasikannya dengan kontrol numerik, robot, sistem CAD/CAM, personal computer, sistem informasi manajemen, *hierarchical computer based systems*.

Perkembangan baru dalam teknologi PLC meliputi juga perangkat antar muka dengan operator yang lebih baik, *graphic user interfaces (GUIs)*, dan *human-oriented man/machine interfaces*. Juga meliputi pengembangan antar muka yang memungkinkan berkomunikasi dengan peralatan, perangkat keras, dan perangkat lunak yang mendukung kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), seperti sistem I/O logika fuzzy. Instruksi PLC baru akan terus berkembang sesuai kebutuhan dan untuk menambah kecerdasan pada pengendali. Tipe instruksi *Knowledge-based and process learning* mungkin akan dikenalakan untuk menambah kemampuan sistem.

## 6.1.2 Keuntungan Penggunaan PLC

Berikut ini beberapa kelebihan sistem kontrol berbasis PLC dibandingkan dengan sistem kontrol konvensional :

- ❖ Jumlah kabel yang dibutuhkan dapat dikurangi;
- ❖ Konsumsi daya PLC lebih rendah dibandingkan dengan sistem kontrol proses berbasis relai;
- ❖ Fungsi diagnostik pada sistem kontrol dengan PLC dapat mendeteksi kesalahan dengan lebih mudah dan cepat;
- ❖ Bila diperlukan perubahan pada urutan operasional, proses atau aplikasi dapat dilakukan dengan lebih mudah, hanya dengan melakukan pergantian program, baik dengan menggunakan *handheld* atau dengan komputer(PC);
- ❖ Tidak membutuhkan suku cadang yang banyak;
- ❖ Bila perlu menggunakan instrumen I/O yang cukup banyak dan fungsi operasional proses cukup kompleks. menggunakan PLC lebih mudah dibandingkan dengan menggunakan sistem konvensional.

## 6.1.3 Penggunaan PLC di Industri

PLC sudah sukses digunakan di berbagai sektor industri seperti industri pengolahan baja, pabrik pembuatan kertas, pabrik pengolah makanan, industri kimia, pembangkit tenaga listrik.

Unjuk kerja pemanfaatan PLC mulai dari kontrol bersifat ON/OFF sampai dengan manufaktur yang memerlukan kontrol yang *sophisticated*.

Berikut ini daftar industri yang menggunakan PLC untuk kontrol proses produksi, dan beberapa tipikal penggunaannya.

➤ **CHEMICAL/PETROCHEMICAL**

- Batch process
- Finished product handling
- Materials handling
- Mixing
- Off-shore drilling
- Pipeline control
- Water/waste treatment

➤ **GLASS/FILM**

- Cullet weighing
- Finishing
- Forming
- Lehr control
- Packaging
- Processing

➤ **FOOD/BEVERAGE**

- Accumulating conveyors
- Blending
- Brewing
- Container handling
- Distilling
- Filling
- Load forming
- Metal forming loading/unloading
- Palletizing
- Product handling
- Sorting conveyors
- Warehouse storage/retrieval
- Weighing

➤ **LUMBER/PULP/PAPER**

- Batch digesters
- Chip handling
- Coating
- Wrapping/stamping

➤ **MANUFACTURING/MACHINING**

- Assembly machines
- Boring

- Cranes
- Energy demand
- Grinding
- Injection/blow molding
- Material conveyors
- Metal casting
- Milling
- Painting
- Plating
- Test stands
- Tracer lathe
- Welding

➤ **METALS**

- Blast furnace control
- Continuous casting
- Rolling mills
- Soaking pit

➤ **MINING**

- Bulk material conveyors
- Loading/unloading
- Ore processing
- Water/waste management

➤ **POWER**

- Burner control
- Coal handling
- Cut-to-length processing
- Flue control
- Load shedding
- Sorting
- Winding/processing
- Woodworking

## 6.2 Konsep Logika

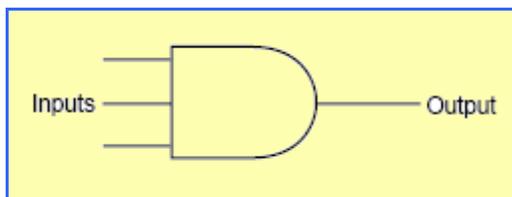
Untuk memahami pengontrol terprogram dan aplikasinya, maka harus dipahami terlebih dahulu konsep logika, karena ini menjadi dasarnya.

### 6.2.1 Fungsi Logika

Konsep biner menunjukkan bagaimana kuantitas fisik (variabel biner) bisa direpresentasikan oleh 1 atau 0, atau seperti sebuah saklar yang mempunyai dua keadaan yaitu ON atau OFF. Pengontrol terprogram membuat suatu keputusan berdasarkan hasil pernyataan logika seperti ini.

Pada sub bab ini akan dijelaskan tiga fungsi logika dasar yaitu AND, OR, dan NOT. Fungsi ini mengkombinasikan variabel biner ke dalam bentuk pernyataan. Masing-masing fungsi mempunyai aturan untuk diterjemahkan kedalam bentuk pernyataan (TRUE atau FALSE) dan simbol untuk merepresentasikannya.

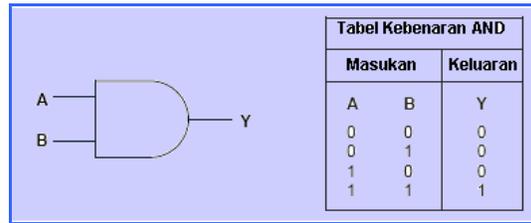
#### 6.2.1.1 Fungsi AND



Gambar 6.4 Gerbang AND

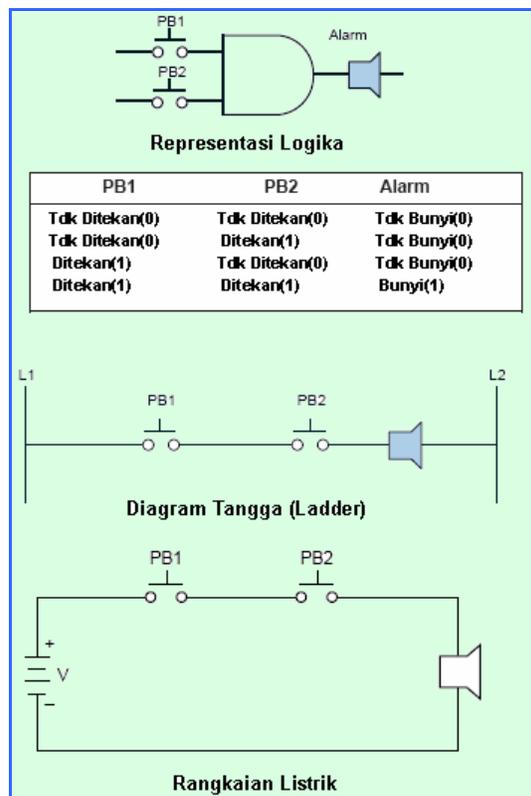
Gambar 6.4 memperlihatkan simbol gerbang AND, digunakan untuk merepresentasikan fungsi AND. Keluaran AND adalah 1(TRUE) hanya jika semua masukan TRUE(1).

Fungsi AND dapat mempunyai jumlah masukan yang tidak terbatas, tetapi tetap keluarannya hanya satu.



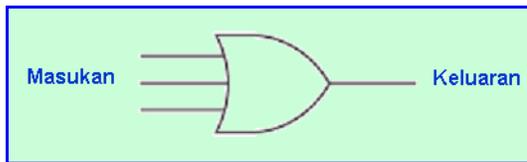
Gambar 6.5 Gerbang AND dengan 2 Masukan dan Tabel Kebenaran

Gambar 6.6 memperlihatkan contoh penggunaan gerbang AND, untuk membunyikan Alarm (sebagai keluaran) dengan menggunakan dua buah *Push Button* PB1 dan PB2 (sebagai masukan).

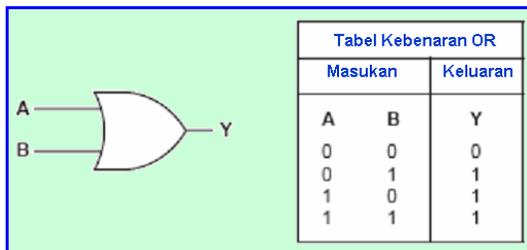


Gambar 6.6 Contoh Aplikasi Gerbang AND

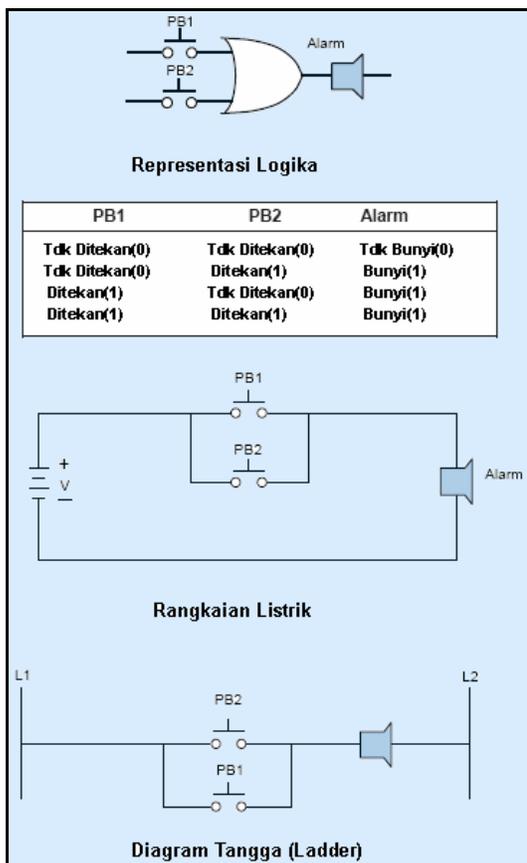
### 6.2.1.2 Fungsi OR



Gambar 6.7 Gerbang OR



Gambar 6.8 Gerbang OR dengan 2 Masukan dan Tabel Kebenaran



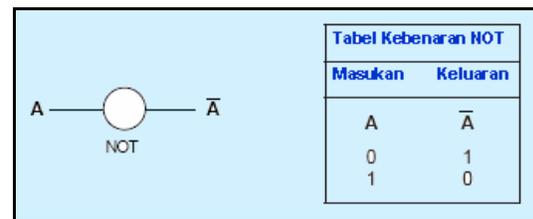
Gambar 6.9 Contoh Aplikasi Gerbang OR

Gambar 6.7 memperlihatkan simbol gerbang OR, digunakan untuk merepresentasikan fungsi OR. Keluaran OR adalah 1 (TRUE) bila salah satu atau semua masukan TRUE (1).

Sama seperti fungsi AND, fungsi gerbang OR dapat mempunyai jumlah masukan yang tidak terbatas, tetapi tetap keluarannya hanya satu.

Gambar 6.9 memperlihatkan contoh penggunaan gerbang OR, untuk membunyikan Alarm (sebagai keluaran) dengan menggunakan dua buah *Push Button* PB1 dan PB2 (sebagai masukan).

### 6.2.1.3 Fungsi NOT

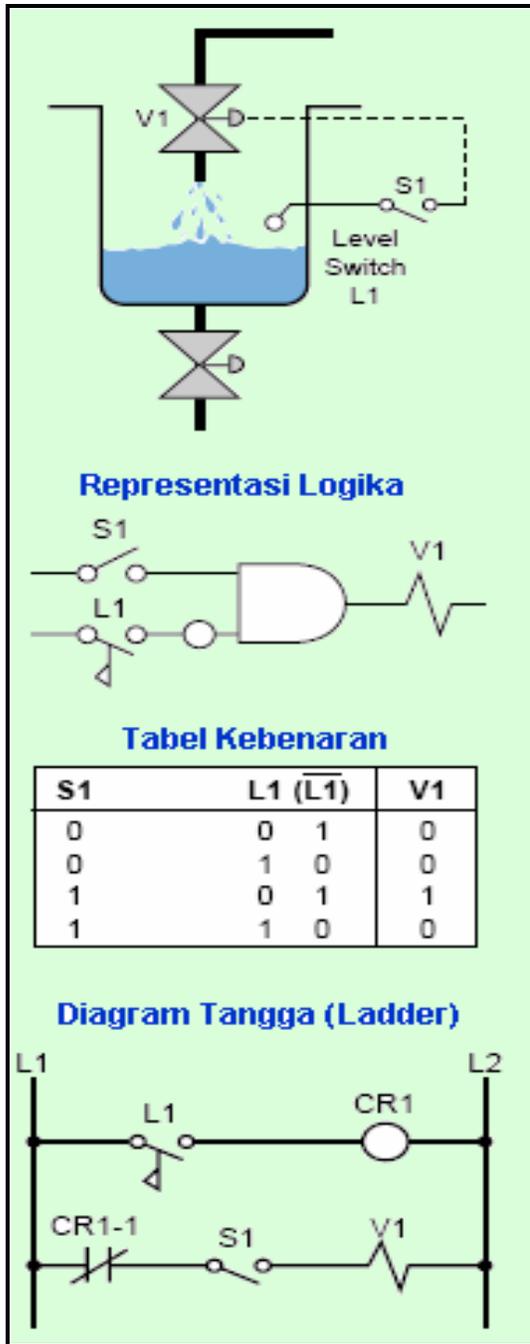


Gambar 6.10 Gerbang OR dan Tabel Kebenaran

Gambar 6.10 memperlihatkan simbol NOT, digunakan untuk merepresentasikan fungsi NOT. Keluaran NOT adalah 1(TRUE) bila masukan FALSE(0). Hasil dari operasi NOT selalu kebalikannya dari masukan, oleh karena itu kadang-kadang disebut *inverter*.

Fungsi NOT tidak seperti fungsi AND atau OR, hanya boleh punya satu masukan saja.

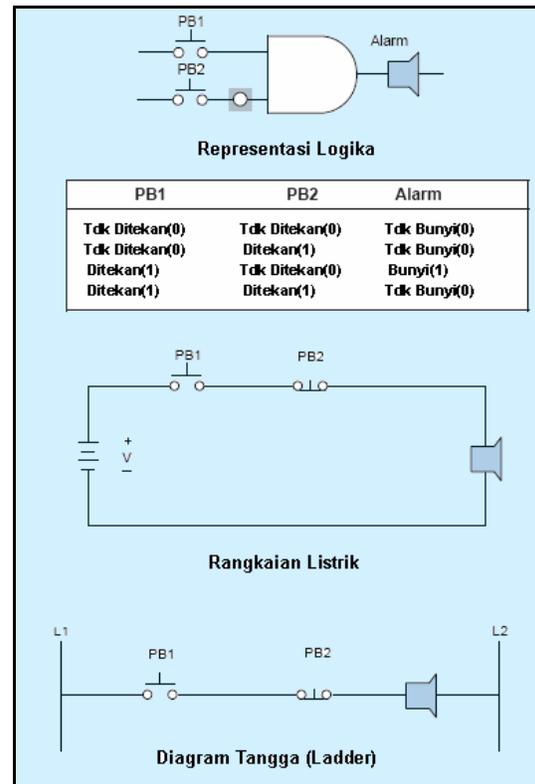
Gambar 6.11 memperlihatkan gerbang logika, tabel kebenaran, representasi logika, untuk katup selenoid(V1) yang akan membuka(ON) bila sakelar pemilih(S1) ON dan bila sakelar pembatas (level switch) L1 NOT ON(cairan tidak sampai menyentuh pembatas).



Gambar 6.11 Contoh Aplikasi Gerbang NOT  
Catt: CR1 = Relai Bantu

Gambar 6.12 memperlihatkan contoh penggunaan gerbang NOT, Alarm akan

berbunyi apabila *Push Button* PB1 ditekan dan PB2 tidak ditekan.

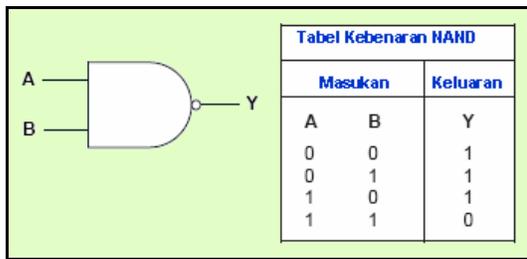


Gambar 6.12 Contoh Aplikasi Gerbang NOT

### 6.2.1.4 Fungsi NAND dan NOR

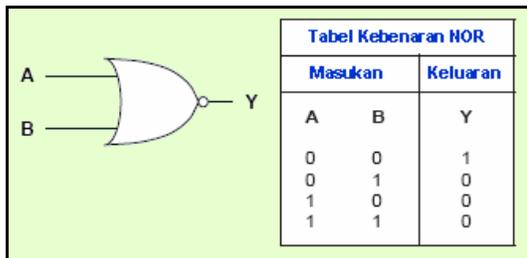
Dua contoh sebelumnya memperlihatkan simbol NOT diletakkan dibagian masukan gerbang. Bila simbol NOT diletakkan dibagian keluaran gerbang AND, maka hasil akan sebaliknya.

Gambar 6.13 memperlihatkan gerbang NAND, gerbang NAND merupakan kebalikan dari gerbang AND. Gerbang AND merupakan penggabungan antara gerbang AND dengan NOT, yang berarti keluaran gerbang logika AND yang dibalik.



Gambar 6.13 Gerbang NAND

Gerbang NOR merupakan kebalikan dari gerbang OR. Gerbang NOR merupakan penggabungan antara gerbang OR dengan NOT, sehingga hasilnya adalah keluaran gerbang OR yang dibalik. Gambar 6.14 memperlihatkan gerbang logika NOR.



Gambar 6.14 Gerbang NOR

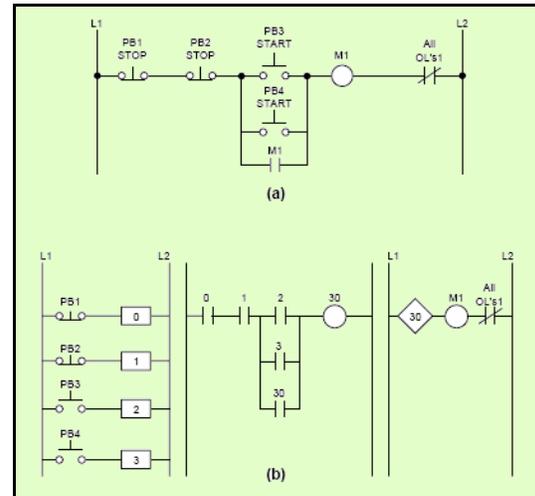
## 6.2.2 Rangkaian PLC dan Simbolik Kontak Logika

Dengan logika *hardwired* untuk mengimplementasikan fungsi kontrol logika (waktu, sekuensial, dan kontrol) dilakukan dengan cara melakukan hubungan antar piranti tersebut. Sedangkan pada PLC yang menggunakan fungsi logika terkendali.

Pada rangkaian dengan logika *hardwired* perubahan rangkaian bisa dilakukan dengan cara mengubah hubungan hubungan antara piranti atau kabel penghubung secara langsung, sedang-

kan pada PLC cukup dilakukan dengan perangkat lunak.

Fungsi utama PLC adalah untuk menggantikan kontrol logika *hardwired* dan mengimplementasikan fungsi kontrol untuk sistem yang baru.



Gambar 6.15 Contoh Rangkaian dengan Logika Hardwired dan Diagram Tangga PLC

Gambar 6.15a memperlihatkan tipikal rangkaian logika relai dengan *hardwired*, dan gambar 6.15b implementasi rangkaian dengan diagram tangga PLC.

Untuk mengimplementasikan hubungan diagram tangga dari rangkaian relai *hardwired* ke PLC dilakukan melalui instruksi perangkat lunak, jadi semua pengawatan dapat diwujudkan secara *softwired* (kebalikan *hardwired*). Bahasa pemrograman yang paling umum digunakan adalah diagram tangga.

Kompleksitas diagram tangga tergantung pada sistem yang akan dikontrol, tapi biasanya masing-masing rangkaian mempunyai satu keluaran.

Masing-masing rangkaian biasa disebut **rung** (atau **network**), rung adalah simbolik kontrol yang dibutuhkan untuk mengontrol sebuah keluaran di dalam PLC.

Lihat kembali gambar 6.15, gambar 6.15a memperlihatkan sebuah rung dari rangkaian *hardwired*, sedangkan gambar 6.15b memperlihatkan sebuah rung untuk rangkaian PLC.

## 6.3 Arsitektur PLC

*Programmable logic controller* (PLC) adalah sebuah pengontrol berbasis mikroprosesor yang memanfaatkan memori yang dapat diprogram untuk menyimpan instruksi-instruksi dan untuk mengimplementasikan fungsi-fungsi, seperti sekunsial, logika, pewaktuan, pencacahan, dan aritmatika untuk mengontrol mesin-mesin atau suatu proses.

PLC dirancang untuk bisa dioperasikan oleh para operator/pengguna dengan sedikit pengetahuan mengenai komputer dan bahasa pemrograman.

PLC di dalamnya telah dilengkapi dengan program awal, sehingga memungkinkan program-program kontrol dima-

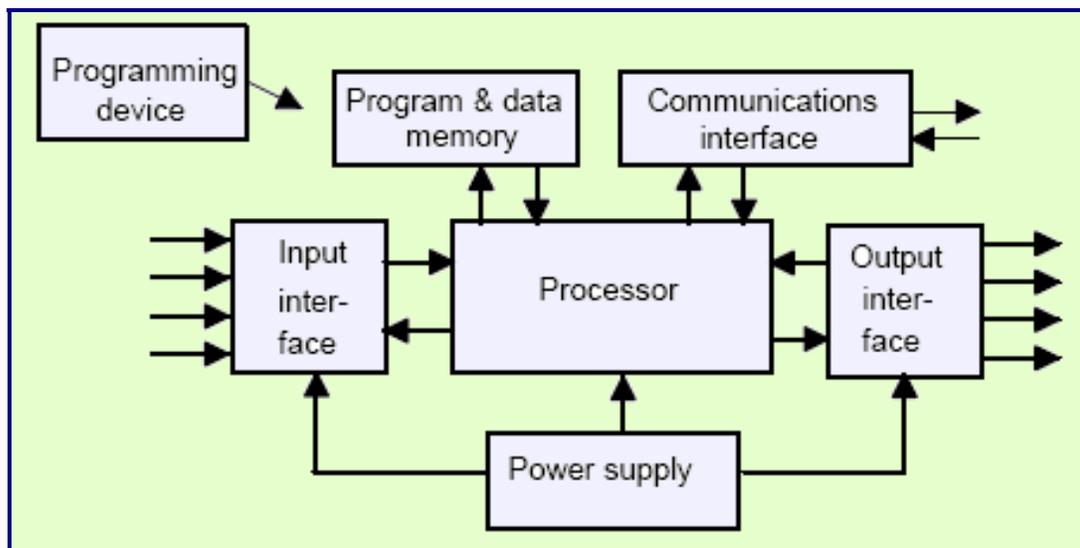
sukan dengan menggunakan suatu bahasa pemrograman yang sederhana dan intuitif.

PLC hampir sama dengan komputer, yang membedakannya komputer dioptimalkan untuk tugas-tugas yang berhubungan dengan perhitungan dan penyajian data, sedangkan PLC dioptimalkan untuk tugas-tugas yang berhubungan dengan pengontrolan dan pengoperasian di dalam lingkungan industri.

Sebuah PLC dirancang dengan memiliki karakteristik sebagai berikut :

- Kokoh dan dirancang untuk tahan terhadap getaran, suhu, kelembaban, dan kebisingan;
- Antarmuka untuk masukan dan keluaran *built-in* di dalamnya;
- Mudah diprogram dan menggunakan bahasa pemrograman yang mudah dipahami, yang sebagian besar berhubungan dengan operasi-operasi logika dan penyambungan.

### 6.3.1 Perangkat Keras

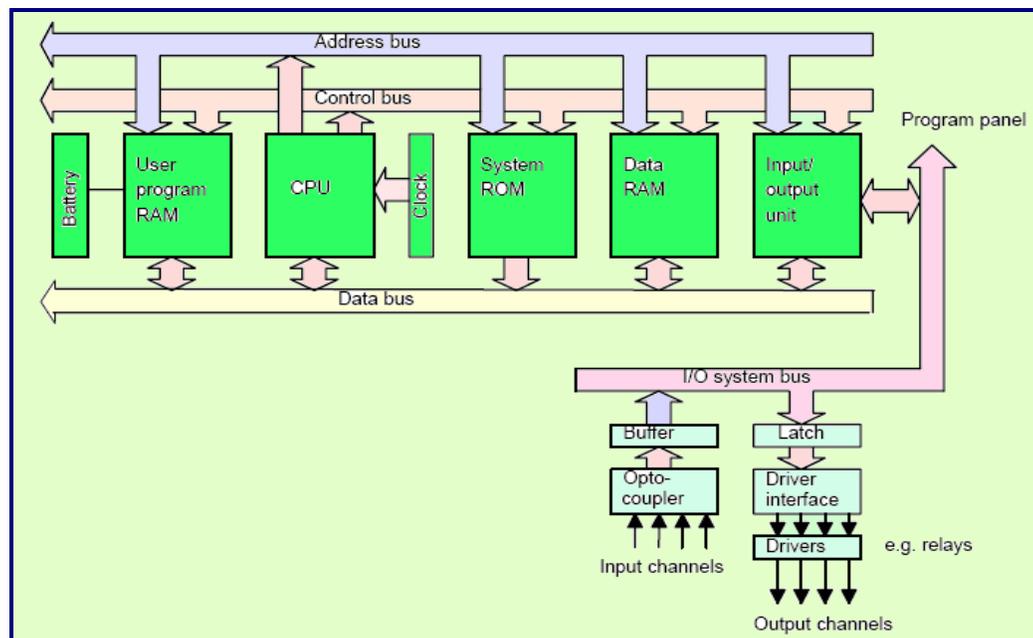


Gambar 6.16 Sistem PLC

Pada umumnya, sebuah PLC mempunyai lima komponen dasar (Gambar 6.16), yaitu :

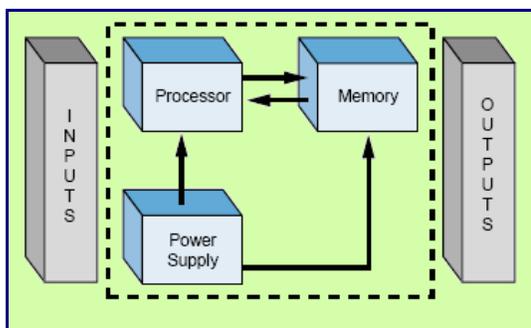
- 1) *Unit prosesor* atau *central processing unit* (CPU) yang di dalamnya berisi mikroprosesor yang mampu menginterpretasikan sinyal-sinyal masukan dan melakukan tindakan-tindakan pengontrolan, sesuai dengan program yang tersimpan di dalam memori, lalu mengkomunikasikan keputusan-keputusan yang diambilnya sebagai sinyal-sinyal kontrol ke antarmuka keluaran;
- 2) *Unit catu daya* yang diperlukan untuk mengubah tegangan arus bolak-balik (ac) dari sumber menjadi tegangan arus searah(dc) yang dibutuhkan oleh prosesor dan rangkaian-rangkaian di dalam modul-modul antarmuka masukan dan keluaran;
- 3) *Perangkat Pemrograman* digunakan untuk memasukan program yang dibutuhkan ke dalam memori. Program-program tersebut dibuat dengan menggunakan perangkat pemrograman dan selanjutnya dipindahkan ke dalam unit memori PLC;
- 4) *Unit memori* merupakan tempat menyimpan program yang akan digunakan untuk melaksanakan tindakan-tindakan pengontrolan yang disimpan mikroprosesor;
- 5) *Bagian masukan dan keluaran* merupakan antarmuka dimana prosesor menerima informasi dari dan mengkomunikasikan informasi kontrol ke perangkat-perangkat diluar. Sinyal-sinyal masukan dapat berasal dari saklar-saklar, sensor-sensor, dan sebagainya. Sinyal-sinyal keluaran bisa diberikan pada alat pengasut motor, katup, lampu, dan sebagainya.

### 6.3.2 Arsitektur Internal



Gambar 6.17 Arsitektur PLC

Gambar 6.17 memperlihatkan arsitektur internal sebuah PLC. Arsitektur ini terdiri dari sebuah *central processing unit* (CPU) yang berisi sistem mikroprosesor, memori, dan rangkaian masukan/keluaran. CPU bertugas mengontrol dan menjalankan semua operasi di dalam PLC. Perangkat ini dihubungkan ke sebuah piranti pewaktu (*clock*) dengan frekuensi antara 1 s.d 8 MHz. Frekuensi ini menentukan kecepatan operasi PLC. Informasi di dalam PLC disalurkan melalui sinyal-sinyal digital. Jalur-jalur internal yang dilalui sinyal-sinyal digital tersebut disebut *bus*. Secara fisik sebuah bus merupakan sejumlah konduktor yang dapat dilalui sinyal-sinyal listrik. CPU menggunakan *bus data* untuk mengirimkan data ke elemen-elemen PLC, *bus alamat* untuk mengirimkan alamat ke lokasi-lokasi penyimpanan data, sedangkan *bus kontrol* untuk sinyal-sinyal yang berhubungan dengan proses kontrol internal. *Bus sistem* digunakan untuk komunikasi antara *port-port* masukan/keluaran dengan unit masukan/keluaran.



Gambar 6.18 Komponen Utama CPU

### 6.3.2.1 Memori

Ada beberapa elemen memori di dalam PLC, yaitu :

#### ➤ Random Access Memory (RAM)

RAM adalah memori internal CPU, dimana isinya dapat dimodifikasi dengan cepat dan secara berulang-ulang. Ukuran memori dapat dispesifikasikan dalam Kilobytes, 1 Kilobytes sama dengan 1024 bytes sedangkan 1 byte sama dengan 8 bit. Sebuah memori yang besarnya 10 Kilobytes sama dengan sebuah memori.

RAM sering disebut juga **read-write memory** karena data secara konstan dapat ditulis ke dalam memori atau dapat dibaca dari memori.

- Memory Program  
Program kontrol disimpan pada tempat cadangan di dalam RAM.

- Proses Image I/O  
Proses image keluaran berfungsi untuk menerima informasi dari masukan dan meneruskannya ke modul keluaran dan mengembalikan informasi dari alat keluaran ke CPU. Keadaan-keadaan masukan tersimpan dalam masukan image tabel.

RAM biasanya dilengkapi battery back-up agar isi memori dapat dipertahankan selama PLC tidak dicatu oleh sistem daya utama.

#### ➤ Read Only Memory (ROM)

Informasi yang ada di dalam ROM hanya dapat dibaca saja. Informasi dimasukkan ke dalam ROM oleh pabrik pembuat untuk digunakan oleh CPU.

Salah satu jenis dari ROM adalah PROM (Programmable Read Only Memory), PROM adalah merupakan cara yang sederhana untuk menyimpan kumpulan program. Untuk melakukan pemrograman PROM membutuhkan suatu unit khusus yang menerima program hasil pengembangan CPU, yang kemudian dipanggil ke dalam programmer PROM.

- Erasable Programmable Read Only Memory (EPROM)

EPROM menyimpan data secara permanen seperti ROM, tetapi ROM tidak membutuhkan battery backup. Isi memori EPROM bisa dihapus dengan penyinaran sinar Ultraviolet. Sebuah PROM writer diperlukan untuk memprogram kembali memori.

- Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (EEPROM)

EEPROM merupakan kombinasi fleksibilitas akses dari RAM dan non-volatility dari EEPROM. Isi memorinya bisa dihapus dan diprogram ulang secara elektrik, tetapi tetap mempunyai batas dalam jumlah program ulang.

### 6.3.2.2 Unit Masukan/Keluaran

Unit masukan/keluaran merupakan sistem mikroelektronika dengan transduser dan aktuator yang berhubungan dengan peralatan-peralatan industri. Unit masukan PLC terdiri dari unit yang mampu mempresentasikan dua level sinyal (masukan level logika) atau mempresentasikan sejumlah level sinyal (level sinyal analog). Unit keluaran yang umumnya digunakan untuk menggerakkan aktuator berfungsi sebagai saklar ON/OFF (keluaran level logika) atau sebagai penggerak yang level keluarannya dapat diatur dalam jangkauan (range) dan langkah (step) tertentu (keluaran level analog).

Selain Unit masukan/keluaran seperti dijelaskan diatas ada juga unit masukan/keluaran yang mempunyai fungsi khusus seperti PID controller, control motor, high speed counter, dll.

Unit masukan/keluaran yang memerlukan proses relatif banyak lebih sering di-

lengkapi prosesor sendiri agar penggunaannya tidak menyita waktu CPU PLC. Setiap jenis masukan/keluaran mempunyai rangkaian penyesuaian sinyal dan rangkaian isolasi.

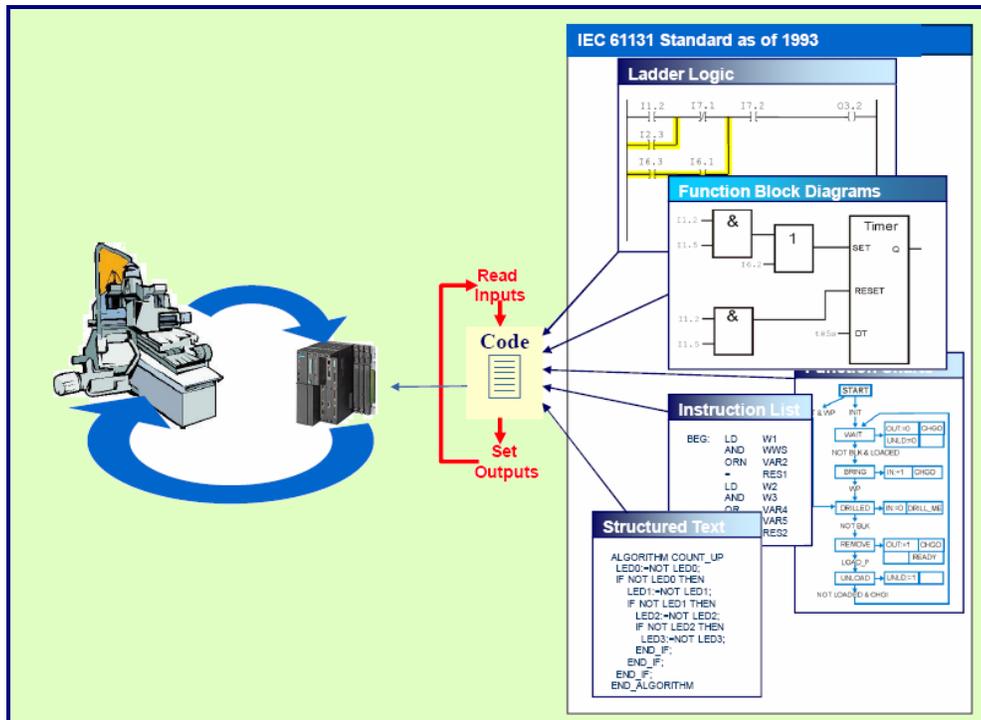
Hubungan CPU dengan proses masukan/keluaran terbatas pada pengiriman parameter operasi dan informasi status. Berdasarkan parameter dari CPU, prosesor masukan/keluaran akan melakukan tugas atau sejumlah tugas. Informasi status atau data hasil operasi diberikan CPU agar dapat digunakan dalam program utama PLC.

Jumlah masukan/keluaran yang diidentifikasi pada suatu PLC umumnya bukan merupakan jumlah unit masukan/keluaran yang terpasang, tetapi jumlah unit masukan/keluaran maksimum yang dapat ditangani oleh CPU. Unit masukan/keluaran umumnya dirancang modular agar penggunaannya dapat disesuaikan terhadap kebutuhan industri yang dikontrol.

## 6.4 Pemrograman PLC

### 6.4.1 Bahasa Pemograman PLC

Masing-masing produsen memiliki ide yang berbeda-beda mengenai pemrograman PLC. Seperti telah disampaikan di bagian awal IEC telah mengajukan sebuah standar, yaitu IEC 1131 bagian 3 (1993), tentang pemograman PLC. Standar ini mengklasifikasikan metode pemrograman ke dalam dua katagori umum: *bahasa tekstual* dan *bahasa grafis*. Bahasa tekstual melibatkan penggunaan teks sedangkan bahasa grafis melibatkan penggunaan gambar



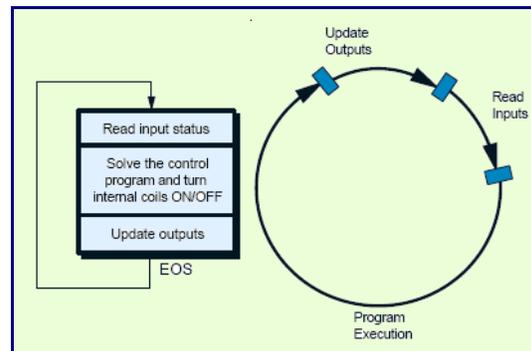
Gambar 6.19 Bahasa Pemrograman Menurut Standar IEC

gambar grafis, seperti diagram tangga dan diagram blok. Bahasa tekstual dua metode yang spesifik, yaitu daftar instruksi dan teks terstruktur. Bahasa grafis juga memiliki dua metode, yaitu diagram tangga dan diagram blok fungsi-si. Standar-standar disusun untuk membantu penulisan program-program dengan menggunakan keempat metode ini dengan menyertakan contoh-contohnya.

Dalam bab ini yang akan dibahas hanya pemrograman PLC dengan menggunakan diagram tangga.

## 6.4.2 Operasi Pembacaan

Operasi pembacaan adalah suatu proses pembacaan program oleh PLC. Operasi siklus pembacaan adalah sebagai berikut (Gambar 6.20) :



Gambar 6.20 Operasi Pembacaan

- ❖ Pembacaan masukan;
- ❖ Eksekusi program;
- ❖ *Update* keluaran.

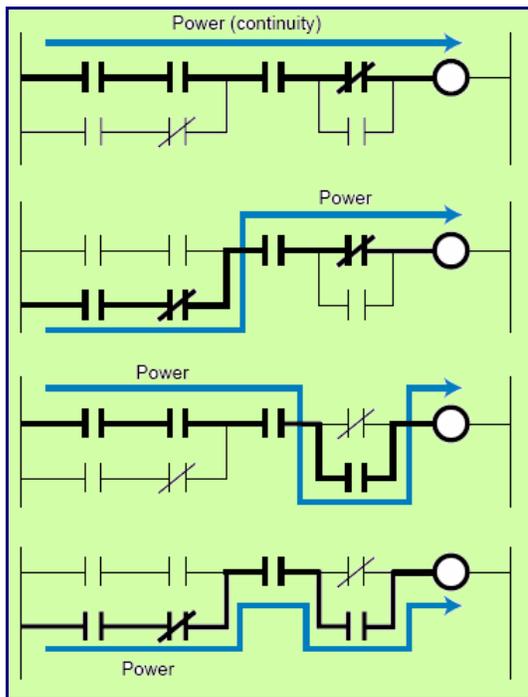
Lama waktu dari pembacaan masukan sampai *update* tergantung pada kecepatan prosesor dan panjangnya program dibuat.

Selama masukan dibaca, terminal-terminal masukan dibaca dan dimasukkan dalam tabel status masukan yang di *update* secara bertahap menurut urutan pembacaan masukan.

Selama proses pembacaan program, data yang dibaca dan masukan dalam tabel status masukan kemudian diterjemahkan pada pengguna program. Saat program dieksekusi, tabel status keluaran di *update* secara cepat sesuai dengan perubahan.

Ketika terjadi proses pembacaan, data yang terkumpul dalam tabel status keluaran dipindahkan ke terminal-terminal keluaran.

Proses pembacaan suatu program ada dua macam, yaitu dari kiri ke kanan pada tiap *rung* (*network*) dan dari *rung* paling atas sampai rung paling bawah.



Gambar 6.21 Ilustrasi Proses Beberapa Eksekusi Relai pada Diagram Tangga

### 6.4.3 Instruksi Dasar PLC

Pada sub bab ini akan dikenal instruksi dasar yang digunakan pada bahasa pemrograman untuk PLC OMRON menggunakan *CX Programmer*.

#### ➤ LOAD(LD)

Intruksi ini diperlukan bila urutan kerja pada suatu sistem kontrol hanya membutuhkan satu kondisi logik saja dan sudah diharuskan untuk mengeluarkan satu keluaran. Logikanya seperti kontak NO relai.



Gambar 6.22 Simbol Load (LD)

#### ➤ LOAD NOT (LDNOT)

Intruksi ini diperlukan apabila urutan kerja pada suatu sistem kontrol hanya membutuhkan satu kondisi logik saja dan sudah diharuskan mengeluarkan keluaran. Logikanya seperti kontak NC relai.



Gambar 6.23 Simbol Load Not (LDNOT)

#### ➤ AND

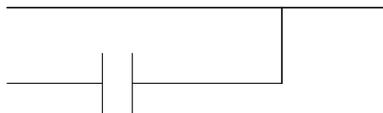
Intruksi ini diperlukan bila urutan kerja (sekuensial) pada suatu sistem kontrol memerlukan lebih dari satu kondisi logik yang harus terpenuhi semuanya untuk mengeluarkan satu keluaran. Logikanya seperti kontak NO relai.



Gambar 6.24 Simbol And

➤ OR

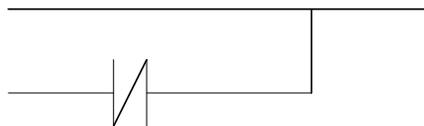
Intruksi ini diperlukan apabila urutan kerja pada suatu sistem kontrol hanya membutuhkan salah satu saja dari beberapa kondisi logik untuk mengeluarkan satu keluaran. Logikanya seperti kontak NO relay.



Gambar 6.25 Simbol OR

➤ OR NOT

Intruksi ini diperlukan apabila urutan kerja pada suatu sistem kontrol hanya membutuhkan salah satu saja dari beberapa kondisi logika untuk mengeluarkan satu keluaran. Logikanya seperti kontak NC relay.



Gambar 6.26 Simbol OR NOT

➤ OUT

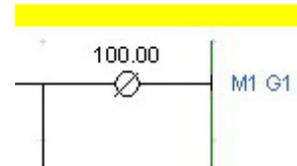
Intruksi ini berfungsi untuk mengeluarkan keluaran bila semua kondisi logika diagram tangga telah terpenuhi. Logikanya seperti kontak NO rele.



Gambar 6.27 Simbol OUT

➤ OUT/OUT NOT

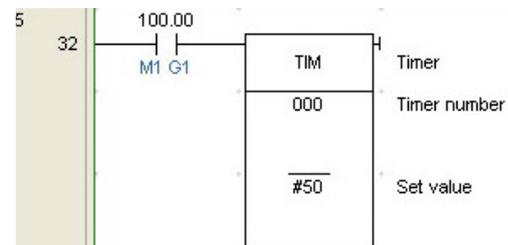
Instruksi OUT/OUT NOT ini digunakan untuk mengeluarkan keluaran apabila semua kondisi logika *ladder* telah terpenuhi. Simbol dari instruksi dasar OUT NOT adalah sebagai berikut:



Gambar 6.28. Instruksi Out Not

➤ TIMER (TIM)

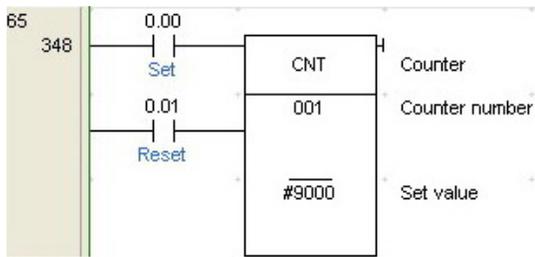
Seperti fungsi ON-delay pada relai, instruksi timer ini digunakan dengan fungsi yang sama, sehingga tidak lagi diperlukan timer konvensional pada suatu proses. Simbol dari instruksi dasar Timer adalah sebagai berikut:



Gambar 6.29. Instruksi Timer

➤ COUNTER (CNT)

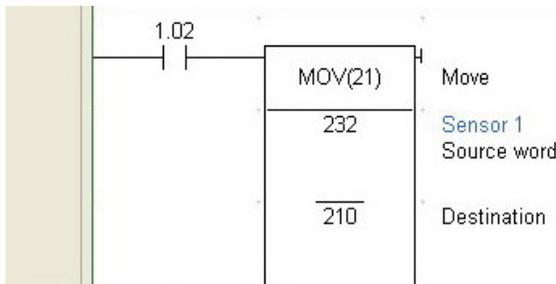
Instruksi counter merupakan salah satu instruksi untuk mengubah sinyal masukan dari kondisi OFF Ke ON sebagai pemicu proses pencacahan. Masukan reset, angka counter, dan nilai set (SV) dapat diatur dalam program. Nilai set dapat diberikan antara 0000-9999. Simbol dari instruksi dasar counter adalah sebagai berikut:



Gambar 6.30. Instruksi Counter

➤ Move

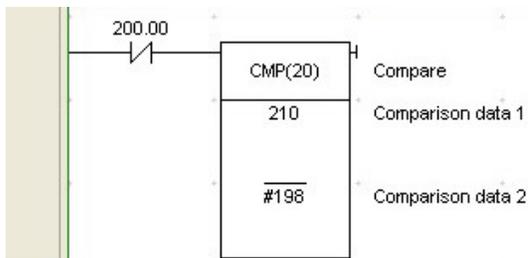
Instruksi *Move* adalah satu instruksi yang digunakan untuk memindahkan data dari satu register ke register lain dalam hal ini dari *source word* ke *destination word*. Simbol dari instruksi move adalah sebagai berikut :



Gambar 6.31. Instruksi Move

➤ Compare

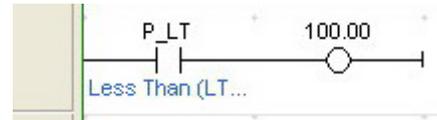
Instruksi *Compare* digunakan membandingkan nilai dari satu register terhadap satu nilai baik itu desimal maupun heksadesimal, tergantung dari nilai yang keluar pada saat instruksi tersebut digunakan. Simbol dari instruksi compare adalah sebagai berikut :



Gambar 6.32. Instruksi Compare

➤ Kontak Less Than (LT)

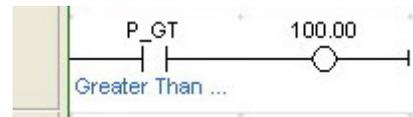
Kontak Less Than (LT) akan berlogika 1 saat nilai dari comparison data 1 lebih kecil dari nilai pada comparison data 2. Berikut contoh penggunaan Less Than (LT) :



Gambar 6.33. Instruksi Less Than

➤ Kontak Greater Than (GT)

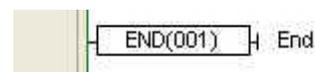
Kontak Greater Than (GT) akan berlogika 1 saat nilai dari comparison data 1 lebih besar dari nilai pada comparison data 2. Berikut contoh penggunaan Greater Than (GT) :



Gambar 6.34. Instruksi Greater Than

➤ END

Untuk mengakhiri semua instruksi yang diberikan pada logika pemrograman, instruksi *End* diberikan sehingga program dapat di eksekusi. Biasanya instruksi *End* ini sudah tersedia, sehingga tidak perlu dibuat.



Gambar 6.35 Instruksi End

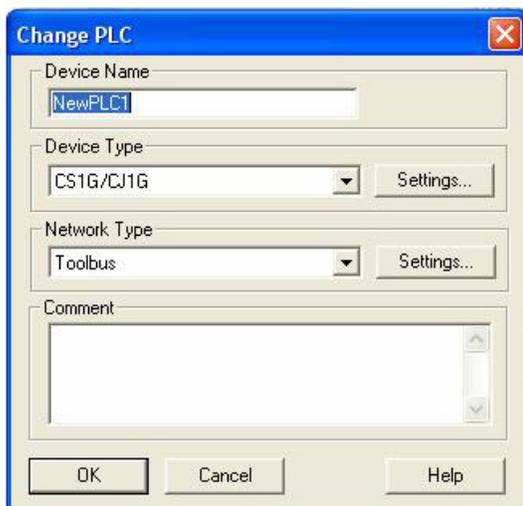


Beberapa bagian utama CX-Programmer berikut fungsinya dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel 6.1 Bagian dan Fungsi CX – Programmer

Nama Bagian	Fungsi
<b>Title Bar</b>	Menunjukkan nama file atau data tersimpan dan dibuat pada CX- Programmer
<b>Menus</b>	Pilihan Untuk memilih Menu
<b>Toolbar</b>	Pilihan untuk memilih fungsi dengan menekan tombol. Select[view] → Toolbar Kemudian dapat memilih <i>toolbar</i> yang ingin ditampilkan.
<b>Section</b>	Dapat membagi program kedalam beberapa blok. Masing-masing blok dapat dibuat atau ditampilkan.
<b>Project WorkSpace Project Tree</b>	Mengatur program dan data. Dapat membuat duplikat dari setiap elemen dengan melakukan <i>Drag</i> dan <i>Drop</i> diantara proyek yang berbeda atau melalui suatu proyek.
<b>Ladder Window</b>	Layar sebagai tampilan atau membuat diagram tangga.
<b>Output Window</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menunjukkan informasi error saat melakukan compile (error check).</li> <li>• Menunjukkan hasil dari pencarian kontak / koil didalam <i>list form</i>.</li> <li>• Menunjukkan detail dari error yang ada pada saat loading suatu proyek.</li> </ul>
<b>Status Bar</b>	Menunjukkan suatu informasi seperti nama PLC, status <i>on line /offline</i> , lokasi dari cell yang sedang aktif.
<b>Information Window</b>	Menampilkan window yang menunjukkan <i>shortcut key</i> yang digunakan pada CX –Programmer.
<b>Symbol Bar</b>	Menampilkan nama, alamat atau nilai dan comment dari simbol yang sedang dipilih <i>cursor</i> .

Gambar 6.37 CX-Programmer New Project.



Setelah mengetahui bagian serta fungsi utama dari pemogram PLC menggunakan CX-Programmer, maka klik *New* maka akan muncul windows seperti terlihat pada gambar 6.37.

Isikan informasi pada tempat yang telah disediakan antara lain nama Project dan type Device.

#### ❖ Pengiriman Program Ke PLC

Setelah penulisan diagram tangga selesai dan disimpan, maka selanjutnya

PLC dapat di *download*. Pertama-tama program yang telah selesai di compile dengan menekan tombol pada menu Toolbar, dan periksa apakah terdapat error pada program yang telah dibuat.

Ada tiga cara untuk fungsi Online, yaitu sebagai berikut:

- *Normal Online*, yaitu online pada saat project masih aktif, yaitu dengan menekan tombol
- *Auto Online*, yaitu online yang secara otomatis mengenali PLC yang terhubung dan memungkinkan untuk PLC online, yaitu dengan menekan tombol
- Online with simulator, yaitu dengan menekan tombol

Setelah Online kita dapat melihat hasil dari program setelah terlebih dahulu menekan tombol. Perlu diperhatikan saat akan online yaitu memilih port yang digunakan untuk berkomunikasi dari PC ke PLC, dari menu Auto online akan terdapat menu pilihan jenis port yang dapat digunakan seperti gambar diperlihatkan pada gambar 6.38.



Gambar 6.38 Select Serial Port

### 6.4.5 Contoh Program

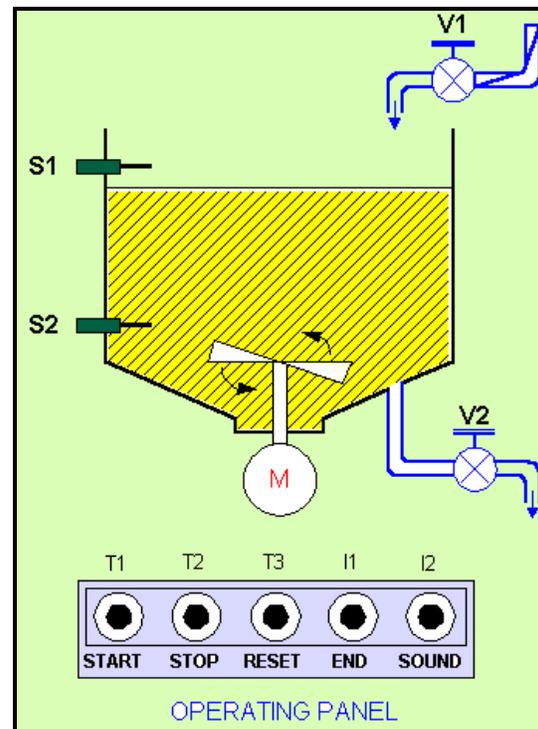
- Pengisian dan Pengosongan Tangki Air

Cara Kerja :

Untuk memulai proses pengisian dan pengosongan tangki air, tekan Tombol T1 yang akan mengakibatkan Katup V1 membuka sehingga air akan mulai mengalir ke dalam tangki dan pada saat bersamaan Motor Pencampur (Mixer) mulai bekerja. Bila level permukaan air pada tangki sudah terpenuhi, yang diindikasikan dengan bekerjanya Sensor S1, maka Katup V1 tertutup dan motor pencampur berhenti bekerja. Selanjutnya Katup V2 terbuka dan air mulai mengalir keluar tangki.

Bila level air turun sampai dengan Sensor S2, maka Katup V2 akan tertutup.

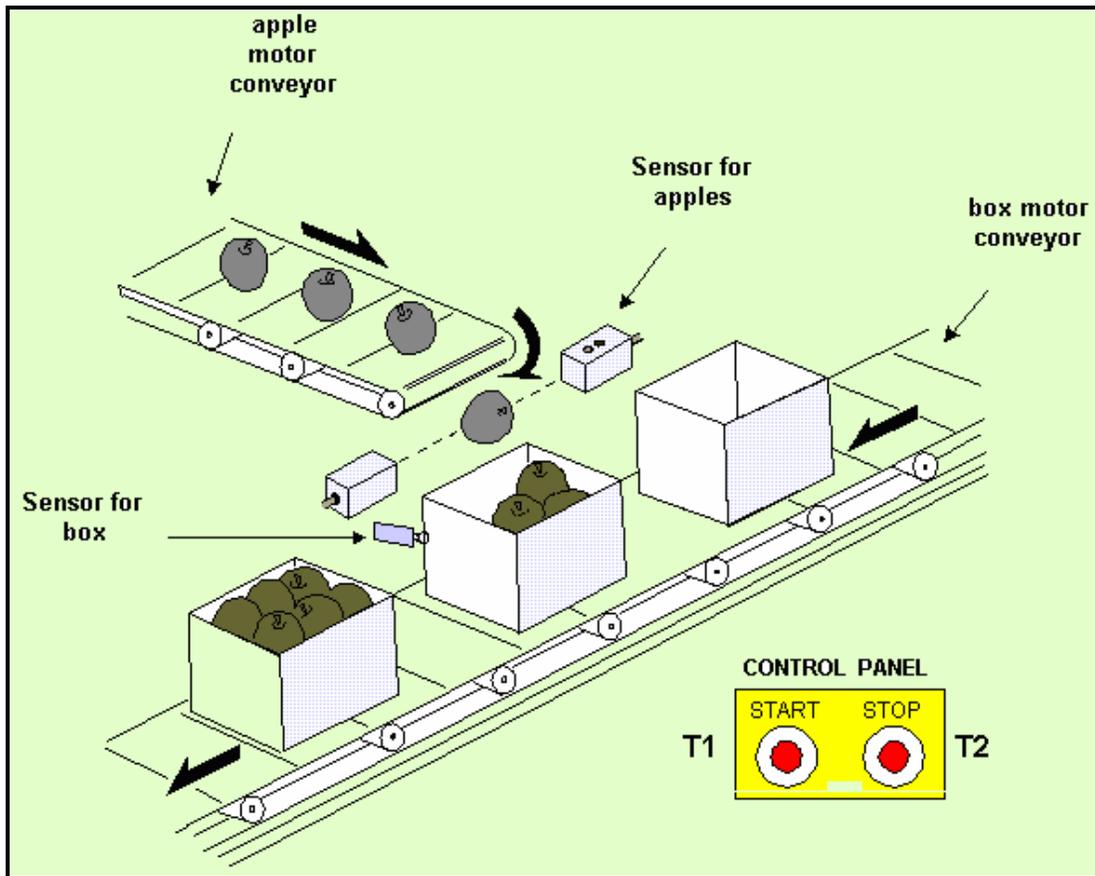
Proses ini akan berulang sampai empat kali, Lampu I1 (END) akan menyala apabila siklus(4x) telah tercapai, dan untuk memulai tekan kembali Tombol T1.



Gambar 6.39 Pengisian dan Pengosongan Tangki Air



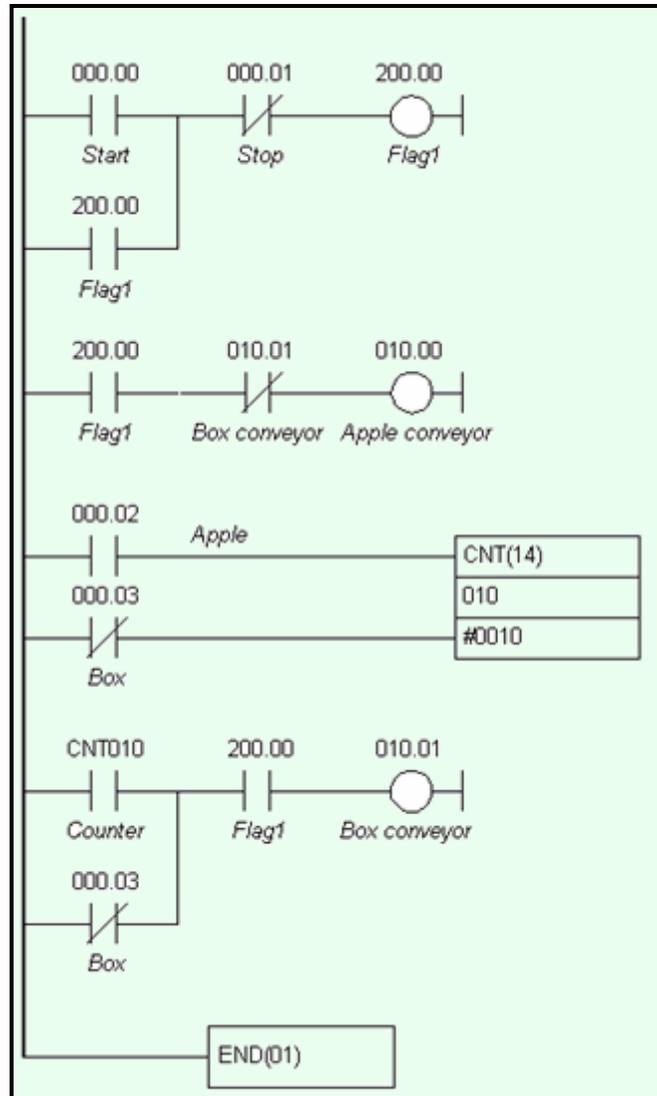
➤ Pengepakan Buah Apel



Gambar 6.41 Pengepakan Buah Apel

Dengan menekan tombol START, motor penggerak akan bekerja dan konveyor pembawa kotak (box) buah apel akan berjalan sampai mengenai limit switch (sensor for box), apabila limit switch tersentuh kotak maka konveyor pembawa kotak akan berhenti berjalan. Satu detik kemudian konveyor pembawa buah apel akan berjalan dan menjatuhkan buah apel ke dalam kotak.

Dibawah konveyor buah apel diletakan sensor cahaya yang berfungsi untuk mendeteksi setiap apel yang jatuh ke dalam kotak. Apabila apel yang dimasukan ke dalam kotak sudah berjumlah 10 (sepuluh) buah, maka konveyor buah apel akan berhenti dan konveyor pembawa kotak kembali berjalan. Siklus operasi konveyor ini akan terus berulang sampai Tombol STOP ditekan.



Gambar 6.42 Diagram Tangga Pengemasan Buah Apel

## 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
- 36 Hutauruk, T.S., Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1999.
- 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
- 41 Jimmy S. Juwana, Panduan Sistem Bangunan Tinggi, Penerbit Erlangga, 2004.
- 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
- 68 Trevor Linsley, Instalasi Listrik Dasar, Penerbit Erlangga, 2004

- 69 T. Davis, Protection of Industrial Power System, Pergamon Press, UK, 1984
- 70 Zan Scbotsman, Instalasi Edisi kelima, Erlangga, 1993
- 71 Zuhail, Dasar Tenaga Listrik dan Elektronika Daya, Gramedia, Jakarta, 1988.
- 72 <http://www.howstuffworks.com>
- 73 [http://www.reinhausen.com/rm/en/products/oltc\\_accessories/](http://www.reinhausen.com/rm/en/products/oltc_accessories/), oil + breather
- 74 <http://www.myinsulators.com/hungary/busing.html>
- 75 <http://www.geindustrial.com/products/applications/pt-optional-accessories.htm>
- 76 [http://www.reinhausen.com/messko/en/products/oil\\_temperature/](http://www.reinhausen.com/messko/en/products/oil_temperature/)
- 77 <http://www.abb.com/cawp/cnabb051/21aa5d2bbaa4281a412567de003b3843.aspx>
- 78 [http://www.cedaspe.com/prodotti\\_ing.html](http://www.cedaspe.com/prodotti_ing.html)
- 79 <http://www.eod.gvsu.edu/~jackh/books/plcs/>
- 80 <http://www.answers.com/topic/motor>
- 81 [http://kaijeli.en.alibaba.com/product/50105621/50476380/Motors/Heavy\\_Duty\\_Single\\_Phase\\_Induction\\_Motor.html](http://kaijeli.en.alibaba.com/product/50105621/50476380/Motors/Heavy_Duty_Single_Phase_Induction_Motor.html)
- 82 [http://www.airraidsirens.com/tech\\_motors.html](http://www.airraidsirens.com/tech_motors.html)
- 83 [http://smsq.pl/wiki.php?title=Induction\\_motor](http://smsq.pl/wiki.php?title=Induction_motor)
- 84 [http://www.allaboutcircuits.com/vol\\_2/chpt\\_13/11.html](http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_13/11.html)
- 85 <http://www.tpub.com/neets/book5/18d.htm>
- 86 <http://www.ece.osu.edu/ems/>
- 87 <http://www.eatonelectrical.com/unsecure/html/101basics/Module04/Output/HowDoesTransformerWork.html>
- 88 <http://www.dave-cushman.net/elect/transformers.html>
- 89 [http://www.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/mdp/electric\\_web/AC/AC\\_9.html](http://www.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/mdp/electric_web/AC/AC_9.html)
- 90 [http://claymore.engineer.gvsu.edu/~jackh/books/plcs/file\\_closeup/](http://claymore.engineer.gvsu.edu/~jackh/books/plcs/file_closeup/) =>clip arts
- 91 [http://img.alibaba.com/photo/51455199/Three\\_Phase\\_EPS\\_Transformer.jpg](http://img.alibaba.com/photo/51455199/Three_Phase_EPS_Transformer.jpg)
- 92 <http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/electricity/generators/index.html>
- 93 <http://www.e-leeh.org/transformer/>
- 94 [http://www.clrwr.com/product\\_selection\\_guide.htm](http://www.clrwr.com/product_selection_guide.htm)
- 95 <http://www.northerntool.com/images/product/images>
- 96 <http://www.alibaba.com>
- 97 <http://www.adbio.com/images/odor>
- 98 <http://www.dansdata.com/images/2fans>
- 99 [http://www.samstores.com/\\_images/products](http://www.samstores.com/_images/products)

- 100 <http://www.wpclipart.com/tools/drill>
- 101 <http://www.atm-workshop.com/images>
- 102 <http://www.oasis-engineering.com>
- 103 <http://www.mikroelektronika.co.yu/english/index.htm>
- 104 <http://www.industrialtext.com>
- 105 <http://www.pesquality.com>
- 106 [http://www.abz-power.com/en\\_25e7d4dc0003da6a7621fb56.html](http://www.abz-power.com/en_25e7d4dc0003da6a7621fb56.html)
- 107 <http://www.usace.army.mil/publications/armymtm/tm5-694/c-5.pdf>
- 108 <http://www.cumminspower.com/www/literature/technicalpapers>
- 109 <http://www.cumminspower.com/www/literature/technicalpapers/F-1538-DieselMaintenance.pdf>
- 110 <http://www.sbsbattery.com/UserFiles/File/Power%20Qual/PT-7004-Maintenance.pdf>

## RIWAYAT PENULIS



*Prih Sumardjati Mulyaseputra*, seorang sarjana pendidikan teknik elektro. Dilahirkan di Yogyakarta tahun 1958, menamatkan studinya tahun 1983 pada Fakultas Pendidikan Teknik Kejuruan, IKIP Yogyakarta, kini Universitas Negeri Yogyakarta pada Jurusan Pendidikan Teknik Elektro. Pengalaman kerja dalam bidang instalasi listrik dimulai sejak lulus STM Yogyakarta I tahun 1976.

Pada tahun 1983 mengikuti training sebagai calon dosen politeknik di Pusat Pengembangan Pendidikan Politeknik (PEDC) Bandung. Tahun 1984 diangkat sebagai Master Teacher Jurusan Teknik Elektro PEDC, dan pernah mengikuti program magang industri di Sprecher +Schuh, Aarau, Switzerland tahun 1990 - 1992. Menjadi dosen politeknik ITB tahun 1995 hingga

sekarang, kini POLBAN. Beberapa *course note*, buku ajar, *job sheet*, *handout* pernah / sedang dikerjakan pada bidang teknik elektro untuk lingkungan POLBAN.

Semenjak tahun 1993 diperbantukan di Dikti sebagai tenaga ahli hingga tahun 2007 dalam kegiatan dibidang pendidikan tinggi, pernah mengikuti dan melaksanakan berbagai seminar, workshop, lokakarya, pengelolaan proyek dalam rangka pengembangan pendidikan politeknik dan program diploma antara lain penyusunan kurikulum; SAP; penulisan bahan ajar; manajemen pendidikan politeknik; evaluasi usulan program studi baru diploma; penyusunan unit perawatan dan perbaikan infrastruktur dan peralatan pendidikan tinggi. Tahun 2000 membantu kegiatan Dikmenjur sebagai tenaga ahli studi pengembangan SMK; tahun 2001 penyusunan perencanaan fasilitas pendidikan SMK; dan tahun 2002 penyusunan Standar Pelayanan Minimal SMK. Tahun 2007, Direktur Pembinaan SMK melalui Kasubdit Pembelajaran memberikan kepercayaan untuk menulis Buku Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik untuk SMK, dan ini merupakan karya buku yang perdana.



*Sofian Yahya*, Staf Pengajar di Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Bandung, lahir pada tanggal 26 Desember 1959 di Garut. Pada tahun 1979 mulai kuliah di FPTK IKIP Padang (Universitas Negeri Padang), kuliah diselesaikan pada tahun 1983.

Tahun 1983 sampai tahun 1984 mengikuti Diklat di Pusat Pengembangan Pendidikan Politeknik Bandung dan diakhir tahun yang sama memulai bertugas sebagai staf pengajar di Polban sampai sekarang, Mata kuliah yang diajarnya adalah Mesin Listrik, PLC, Pemrograman Komputer, Alat

Ukur dan Pengukuran Listrik.

Berbagai jabatan pernah didudukinya, diantaranya Ketua Program Studi, Kepala Laboratorium Mesin Listrik, dan Kepala Laboratorium PLC & Komputasi. Pada

tahun 1999 dan lulus tahun 2001 mengikuti pendidikan Diploma IV di Jurusan Teknik Elektro ITB, dengan bidang keahlian Teknik Kendali.

Tahun 2000 pernah membantu kegiatan Dikmenjur sebagai tenaga ahli studi pengembangan SMK; kemudian tahun 2001 dalam kegiatan penyusunan perencanaan fasilitas pendidikan SMK; dan tahun 2002 dalam kegiatan penyusunan Standar Pelayanan Minimal SMK.



*Ali Mashar*, lahir di Jombang tanggal 23 Juni 1959. Pada saat ini penulis adalah dosen di Jurusan Teknik Konversi Energi – Politeknik Negeri Bandung (Politeknik ITB). Lulus dari Jurusan Teknik Listrik FPTK-IKIP Yogyakarta pada tahun 1983. Sebelum menjadi dosen di Politeknik Negeri Bandung (Politeknik ITB), penulis sempat mendapatkan pelatihan sebagai pengajar di bidang teknik listrik selama satu tahun di Pusat Pengembangan Pendidikan Politeknik (PEDC) Bandung. Kemudian mendapat tugas belajar di HTL Raperswil Switzerland selama satu tahun di bidang *General Energy Technology*.

Ketika tugas belajar di Swiss, penulis juga sempat mendapatkan pengalaman praktis di **Escherwiss-Zurich** di bidang *Water Turbines*, **Sulzer-Winterthur** di bidang *Electrical Power*, dan di **BBC-Baden** di bidang *Electric Machines for Traction*. Penulis menyelesaikan program master (S2) di **School of Electrical Engineering, The University of New South Wales (UNSW), Sydney-Australia** pada tahun 1994. Selain menjadi dosen di Politeknik Negeri Bandung, penulis sempat bekerja di Pusat Pengembangan Pendidikan Politeknik (PEDC) mulai tahun 1986 – 1996 sebagai tenaga teknis dan manajerial.

Penulis pernah menulis buku Petunjuk Praktikum Teknik Kendali (1996) dan Petunjuk Praktikum Elektronika Daya (1996). Di samping itu, atas sponsor PEDC, penulis pernah menterjemahkan buku *Process Control Instrumentation Technology* (Curtis D. Johnson) dan *Electric Machinery* (Peter F. Ryff) dengan sponsor GTZ. Penulis juga aktif dalam memberikan pelatihan-pelatihan profesional di bidang ketenagalistrikan dan *Industrial Safety* bagi karyawan-karyawan industri maju di Indonesia.

**ISBN 978-979-060-093-5**  
**ISBN 978-979-060-096-6**

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 46 Tahun 2007 tanggal 5 Desember 2007 tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran yang Memenuhi Syarat Kelayakan untuk Digunakan dalam Proses Pembelajaran.

**HET (Harga Eceran Tertinggi) Rp. 13,090.00**