



BUKU AJAR

# DASAR KONVERSI ENERGI LISTRIK



**EVA MAGDALENA SILALAH**

**BUKU AJAR**  
**DASAR KONVERSI ENERGI LISTRIK**

**Penulis:**

**Eva Magdalena Silalahi, ST, MT**

**UKI PRESS**  
**Pusat Penerbitan dan Pencetakan**  
**Buku Perguruan Tinggi**  
**Universitas Kristen Indonesia**  
**Jakarta**  
**2024**

**BUKU AJAR**  
**DASAR KONVERSI ENERGI LISTRIK**

Penulis:

**Eva Magdalena Silalahi, ST, MT**

Editor:

**Ir. Bambang Widodo, MT**

**Eva Magdalena Silalahi, ST, MT**

**ISBN: 978-623-8737-07-9**

Penerbit: UKI Press

Anggota APPTI

Anggota IKAPI

Redaksi: Jl. Mayjen Sutoyo No.2 Cawang Jakarta - 13630

Telp. (021) 8092425

Cetakan I Jakarta: UKI Press, 2024

Hak cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit.

# KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah Yang Maha Esa atas anugerah dan berkat-Nya, maka terselesainya proses penyusunan buku ajar ini berhasil dengan baik. Buku ajar ini berjudul “Dasar Konversi Energi Listrik”, yang merupakan salah satu buku pembelajaran bagi para mahasiswa Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia.

Buku pembelajaran ini disusun dalam tiga belas bab yang secara keseluruhan memiliki bobot 3 SKS di mana masing-masing bab akan memperlihatkan pokok-pokok penting yang harus dipahami dan dikuasai oleh para mahasiswa.

Semoga buku materi pembelajaran ini dapat bermanfaat bagi mahasiswa dan bagi siapa pun yang ingin mempelajari Dasar Konversi Energi Listrik. Kiranya buku ini masih jauh dari sempurna, sehingga perlu masukan yang bermanfaat untuk pengembangan selanjutnya.

Saya ucapkan terimakasih atas selesainya buku ajar ini, khususnya atas arahan dan bimbingan yang telah diberikan, terutama kepada:

1. UKI Press, yang berperan besar bagi terbitnya buku ajar ini dengan label ISBN.
2. Bapak Ir. Bambang Widodo, MT, selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia (UKI).
3. Bapak Ir. Robinson Purba, MT, sebagai dosen senior Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia (UKI), yang telah membimbing saya dalam mata kuliah ini.

Namun, saya menyadari bahwa buku ajar ini masih jauh dari sempurna, sehingga saya mengharapkan masukan dan saran yang membangun guna perbaikan berkelanjutan buku ajar ini di kemudian hari.

Jakarta, 8 Juli 2024

Penulis,

ttd,

Eva Magdalena Silalahi, ST, MT

# DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>ii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>BAB 1 SISTEM TENAGA LISTRIK</b> .....	<b>1</b>
1.1 Pendahuluan .....	1
1.2 Dasar Sistem Tenaga Listrik .....	1
1.3 Sistem Konversi Energi Listrik .....	4
1.4 Elemen Sistem Tenaga Listrik.....	6
1.5 Pusat Pembangkit dan Operasi Ekonomisnya .....	7
1.5.1 Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU) .....	8
1.5.2 Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG) .....	10
1.5.3 Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).....	11
1.5.4 Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA).....	12
1.5.5 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH).....	14
1.5.6 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (Angin) .....	15
1.5.7 Pembangkit Listrik Tenaga Surya .....	17
1.6 Karakteristik Beban .....	19
1.7 Proteksi .....	21
1.8 Soal Latihan.....	22
<b>BAB 2 DASAR MEDAN MAGNETIK</b> .....	<b>23</b>
2.1 Pendahuluan .....	23
2.2 Medan Elektromagnetik .....	23
2.2.1 Permeabilitas Mutlak dan Relatif dari suatu Media .....	23

2.2.2	Hukum Gaya Magnetik .....	24
2.2.3	Kuat Medan Magnet (H) .....	25
2.2.4	Potensial Magnetik.....	26
2.2.5	Fluks per Kutub Unit.....	26
2.2.6	Kerapatan Fluks (B) .....	26
2.2.7	Permeabilitas Mutlak ( $\mu$ ) dan Permeabilitas Relatif ( $\mu r$ ) .	27
2.2.8	Gaya pada Konduktor Pembawa Arus yang Berada dalam Medan Magnet.....	28
2.2.9	Hukum Kerja Ampere atau Hukum Rangkaian Ampere ..	30
2.2.10	Gaya Magnetomotive di sekitar Konduktor Lurus Panjang.....	31
2.3	Rangkaian Magnetik.....	32
2.3.1	Rangkaian Magnetik Seri Komposit .....	35
2.3.2	Bagaimana menentukan ampere-turn?.....	35
2.3.3	Perbandingan Antara Rangkaian Magnetik dan Rangkaian Listrik .....	36
2.3.4	Rangkaian Magnetik Paralel .....	37
2.3.5	Rangkaian Magnetik Seri-Paralel.....	38
2.3.6	Fluks Bocor dan Koefisien Bocor Hopkinson.....	39
2.3.7	Kurva Magnetisasi.....	40
2.4	Soal Latihan.....	44
<b>BAB 3</b>	<b>HISTERESIS DAN ARUS EDDY .....</b>	<b>49</b>
3.1	Pendahuluan .....	49
3.2	Histeresis Magnetik .....	49
3.2.1	Area Loop Histeresis .....	51
3.3	Sifat-Sifat dan Aplikasi Bahan Ferromagnetik.....	53
3.3.1	Bahan Magnet Permanen .....	54

3.3.2	Hukum Histeresis Steinmetz .....	57
3.3.3	Daya Angkat Magnet .....	59
3.3.4	Sistem Pengapian Mobil.....	62
3.3.5	Kerja Sistem Pengapian Mesin Mobil.....	62
3.4	Kehilangan Energi dalam Inti Ferromagnetik .....	63
3.4.1	Rugi Histeresis .....	63
3.4.2	Mengapa histeresis terjadi? .....	65
3.4.3	Rugi Arus Eddy .....	66
3.5	Soal Latihan.....	67
<b>BAB 4</b>	<b>DASAR ELEKTROMAGNETIK.....</b>	<b>69</b>
4.1	Pendahuluan .....	69
4.2	Dasar Elektromagnetik .....	69
4.2.1	Hubungan Antara Magnet dan Listrik.....	69
4.2.2	EMF dan Arus Induksi .....	70
4.2.3	Prinsip Medan Magnetik .....	71
4.2.4	Sumber Medan Magnetik.....	72
4.3	Rangkaian Magnetik.....	75
4.3.1	Hukum Ampere pada Medan Magnet .....	76
4.3.2	Analogi Rangkaian Magnetik.....	79
4.3.3	Perilaku Magnetik Bahan Ferromagnetik .....	88
4.4	Hukum Faraday .....	91
4.4.1	Tegangan Induksi Medan Magnet yang Berubah Setiap Saat.....	91
4.4.2	Hukum Faraday .....	92
4.4.3	Sumber Gaya Induksi pada Kawat.....	95
4.4.4	Tegangan Induksi pada Konduktor yang Bergerak dalam Medan Magnet.....	96

4.4.5	Mesin DC Linear .....	96
4.4.6	Hukum Faraday tentang Induksi Elektromagnetik.....	97
4.4.7	Hukum Lenz.....	100
4.4.8	EMF Induksi.....	101
4.4.9	EMF yang diinduksi secara dinamis .....	102
4.4.10	EMF Induksi Statis.....	106
4.5	Soal Latihan.....	108
<b>BAB 5</b>	<b>TRANSFORMATOR DAN KONSTRUKSI .....</b>	<b>111</b>
5.1	Pendahuluan .....	111
5.2	Pengertian Transformator.....	111
5.2.1	Simbol Transformator .....	115
5.3	Jenis-Jenis Transformator.....	115
5.3.1	Transformator <i>step-up</i> .....	115
5.3.2	Transformator <i>step-down</i> .....	116
5.3.3	Auto Transformator.....	116
5.3.4	Auto Transformator Variabel.....	117
5.3.5	Transformator isolasi.....	117
5.3.6	Transformator pulsa .....	117
5.4	Konstruksi Transformator .....	118
5.4.1	Tipe inti .....	118
5.4.2	Tipe cangkang .....	118
5.4.3	Bagian utama Transformator.....	119
5.5	Soal Latihan.....	124
<b>BAB 6</b>	<b>PRINSIP KERJA TRANSFORMATOR TRANSFORMATOR IDEAL .....</b>	<b>125</b>
6.1	Pendahuluan .....	125

6.2	Prinsip Kerja Transformator.....	125
6.2.1	Persamaan <i>EMF</i> Transformator.....	128
6.2.2	Rasio Transformasi Tegangan (K).....	130
6.2.3	Kondisi Transformator Ideal.....	131
6.2.4	Perbandingan Transformasi.....	133
6.3	Soal Latihan.....	137
<b>BAB 7</b>	<b>RANGKAIAN EKIVALEN DAN PENGUJIAN TRANSFORMATOR.....</b>	<b>139</b>
7.1	Pendahuluan.....	139
7.2	Transformator Tanpa Beban.....	139
7.3	Kondisi Tranformator Secara Praktis.....	141
7.4	Rangkaian Ekuivalen Transformator.....	143
7.5	Pengujian Transformator.....	157
7.5.1	Pengujian Beban Nol.....	158
7.5.2	Pengujian Hubung Singkat.....	159
7.6	Efisiensi Transformator.....	162
7.7	Soal Latihan.....	164
<b>BAB 8</b>	<b>MESIN INDUKSI / TAK SEREMPAK KONSTRUKSI DAN PRINSIP KERJA.....</b>	<b>167</b>
8.1	Pendahuluan.....	167
8.2	Mesin Tak Serempak (Mesin Induksi).....	167
8.3	Konstruksi Motor Induksi.....	168
8.4	Prinsip Kerja Motor Induksi.....	171
8.5	Slip (S).....	172
8.6	Frekuensi Arus Rotor.....	172
8.7	Rangkaian Rotor Motor Induksi.....	173

8.8	Soal Latihan.....	176
8.8.1	Soal Teori Motor Induksi.....	176
8.8.2	Soal Perhitungan Motor Induksi.....	176
<b>BAB 9</b>	<b>MESIN INDUKSI / TAK SEREMPAK RANGKAIAN EKIVALEN DAN PENGATURAN.....</b>	<b>177</b>
9.1	Pendahuluan.....	177
9.2	Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi.....	177
9.2.1	Rangkaian ekuivalen yang sebenarnya.....	177
9.2.2	Analisis Rangkaian Ekuivalen Yang Sebenarnya.....	180
9.2.3	Rangkaian ekuivalen pendekatan.....	185
9.3	Tingkatan Daya pada Motor Induksi.....	185
9.4	Torsi Pada Motor Induksi.....	187
9.5	Pengujian Motor Induksi.....	192
9.5.1	Pengujian beban nol.....	192
9.5.2	Pengujian hubung singkat atau rotor diblok.....	196
9.6	Soal Latihan.....	198
9.6.1	Soal Teori Motor Induksi.....	198
9.6.2	Soal Perhitungan Motor Induksi.....	198
<b>BAB 10</b>	<b>MOTOR ARUS SEARAH (DC) KONSTRUKSI DAN PRINSIP KERJA.....</b>	<b>201</b>
10.1	Pendahuluan.....	201
10.2	Motor Arus Searah.....	201
10.3	Konstruksi Motor Arus Searah.....	203
10.3.1	Badan Motor (rangka).....	205
10.3.2	Kutub Medan.....	206
10.3.3	Sikat.....	206

10.3.4	Kumparan Medan .....	207
10.3.5	Kumparan Jangkar.....	207
10.3.6	Inti Jangkar .....	207
10.3.7	Komutator.....	208
10.3.8	Celah Udara.....	209
10.4	Prinsip Kerja Motor Arus Searah .....	209
10.4.1	Prinsip Dasar Cara Kerja.....	210
10.5	Soal Latihan.....	215
<b>BAB 11</b>	<b>MOTOR ARUS SEARAH (DC) RANGKAIAN EKIVALEN DAN PENGATURAN .....</b>	<b>217</b>
11.1	Pendahuluan .....	217
11.2	Jenis Motor Arus Searah .....	217
11.2.1	Motor arus searah berpenguatan bebas .....	217
11.2.2	Motor arus searah berpenguatan sendiri.....	218
11.3	Torsi Motor Arus Searah .....	223
11.4	Kecepatan Motor Arus Searah.....	227
11.5	Karakteristik Motor Arus Searah.....	231
11.6	Pengendalian Kecepatan Motor Arus Searah .....	235
11.7	Efisiensi Mesin Arus Searah .....	240
11.8	Efisiensi motor arus searah.....	241
11.9	Soal Latihan.....	243
<b>BAB 12</b>	<b>GENERATOR ARUS SEARAH (DC) .....</b>	<b>245</b>
12.1	Pendahuluan .....	245
12.2	Konstruksi Mesin Arus Searah.....	245
12.3	Bagian-Bagian Penting Generator Arus Searah .....	247
12.3.1	Badan generator.....	247

12.3.2	Inti kutub magnet dan lilitan penguat magnet .....	248
12.3.3	Jangkar .....	249
12.3.4	Lilitan jangkar .....	250
12.4	Prinsip Kerja Generator Arus Searah .....	251
12.5	Tegangan Induksi pada Loop yang Berputar.....	252
12.6	Cara Memperoleh Tegangan DC dari Loop yang Berputar .....	253
12.7	Persamaan Umum Tegangan Generator Arus Searah .....	257
12.8	Jenis-jenis Generator Arus Searah.....	258
12.9	Karakteristik (Watak) Generator Arus Searah .....	268
12.10	Soal Latihan.....	274
<b>BAB 13</b>	<b>GENERATOR SINKRON.....</b>	<b>277</b>
13.1	Pendahuluan .....	277
13.2	Generator Sinkron .....	278
13.3	Generator Sinkron Sebagai Pembangkit Energi Listrik .....	279
13.4	Konstruksi Generator Sinkron.....	280
13.5	Faktor Kilar .....	293
13.6	Faktor Distribusi.....	294
13.7	Hukum Dasar Pembangkitan Tegangan Induksi .....	295
13.8	Prinsip Kerja Generator Sinkron .....	296
13.9	Frekuensi Generator Sinkron.....	298
13.10	<i>GGL</i> Induksi pada Alternator.....	299
13.11	Analisis Prinsip Kerja Generator Sinkron .....	301
13.11.1	Reaksi Jangkar Generator Sinkron.....	303
13.11.2	Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron.....	305
13.11.3	Efek Perubahan Beban Pada Generator Yang Beroperasi Sendiri .....	308
13.11.4	Faktor Daya .....	309

13.12	Generator Serempak Berbeban.....	310
13.13	Diagram Vektor Generator Serempak Berbeban.....	311
13.13.1	Diagram vektor untuk beban non induktif .....	311
13.13.2	Diagram vektor untuk beban induktif .....	312
13.13.3	Diagram vektor untuk beban kapasitif .....	313
13.14	Regulasi Tegangan Generator Serempak .....	314
13.15	Efisiensi .....	316
13.16	Kerja Paralel Generator Serempak .....	319
13.16.1	Maksud dan tujuan kerja paralel .....	319
13.16.2	Syarat kerja paralel.....	319
13.17	Soal Latihan.....	319
	<b>REFERENSI .....</b>	<b>321</b>
	<b>BIOGRAFI PENULIS .....</b>	<b>322</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1.	Sistem tenaga listrik.....	2
Gambar 1. 2.	Transmisi listrik tegangan tinggi. ....	4
Gambar 1. 3.	Mekanisme konversi energi pada motor, generator dan transformator melalui medium medan magnet. ....	4
Gambar 1. 4.	Sistem tenaga listrik dari pembangkit, transmisi, distribusi hingga beban listrik.....	7
Gambar 1. 5.	Siklus lengkap proses pembangkitan energi listrik PLTU.....	9
Gambar 1. 6.	Lokasi PLTU di pinggir pantai. ....	9
Gambar 1. 7.	Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).....	10
Gambar 1. 8.	Skema pembangkitan energi listrik PLTG.....	11
Gambar 1. 9.	Skema pembangkitan energi listrik PLTN.....	12
Gambar 1. 10.	Komponen-komponen PLTG.....	12
Gambar 1. 11.	Prinsip kerja PLTA. ....	14
Gambar 1. 12.	Skema sederhana PLTMH. ....	15
Gambar 1. 13.	Contoh pemanfaatan PLTMH.....	15
Gambar 1. 14.	Perkembangan teknologi energi angin.....	16
Gambar 1. 15.	Konstruksi dan komponen dari turbin energi angin.....	16
Gambar 1. 16.	Turbin energi angin tiga bilah (( <i>blade</i> ), sumbu mendatar. ....	17
Gambar 1. 17.	Beberapa contoh turbin energi angin yang digunakan di USA, Spanyol, Denmark dan Jerman. ....	17
Gambar 1. 18.	Sistem PV yang terhubung ke jaringan rumah.....	18
Gambar 1. 19.	Prinsip kerja dari sel <i>photovoltaic</i> (PV).....	18
Gambar 1. 20.	Dua konfigurasi dasar PLTS (a). Sistem mandiri ( <i>stand-alone</i> ), dan (b). Sistem <i>cogeneration</i> atau sistem penunjang ke sistem grid. ....	19
Gambar 1. 21.	Beberapa contoh pemanfaatan PLTS. ....	19

Gambar 1. 22.	Kurva beban harian energi listrik. ....	21
Gambar 2. 1.	Garis-garis gaya magnet keluar dari kutub U menuju kutub S. ....	26
Gambar 2. 2.	Sebatang magnet ditempatkan dalam kuat medan seragam... ..	27
Gambar 2. 3.	(a) Konduktor $XY$ terletak ada sudut siku-siku terhadap bidang horizontal seragam kerapatan fluks $\mathbf{B}$ , dan (b) Aturan Tangan Kiri. ....	29
Gambar 2. 4.	Aturan tangan kiri datar. ....	30
Gambar 2. 5.	Hukum Ampere berlaku pada lintasan tertutup. ....	31
Gambar 2. 6.	Sebuah konduktor lurus diasumsikan tak terhingga dengan arah arus keatas.....	32
Gambar 2. 7.	Cincin besi toroidal yang memiliki jalur magnet $l$ meter, luas penampang $A$ m <sup>2</sup> , jumlah lilitan kumparan $N$ dengan $I$ ampere-turn. ....	33
Gambar 2. 8.	Rangkaian magnet seri komposit yang terdiri dari tiga bahan magnet berbeda.....	35
Gambar 2. 9.	Rangkaian magnetik paralel dua jalur paralel $ACB$ dan $ADB$ .....	38
Gambar 2. 10.	Rangkaian magnetik seri-paralel $ACB$ dan $ADB$ terhubung melalui jalur magnet umum $AB$ yang berisi celah udara.....	39
Gambar 2. 11.	Cincin besi dengan kumparan, celah udara dan fluks bocor..	40
Gambar 2. 12.	Kurva magnetisasi $H - B$ dari beberapa bahan magnet. ....	41
Gambar 2. 13.	Spesimen cincin dengan kumparan dan luas penampang seragam. ....	42
Gambar 2. 14.	Gambar soal latihan No.2.....	45
Gambar 2. 15.	Gambar soal latihan No.3.....	45
Gambar 2. 16.	Rangkaian magnet soal latihan No.5.....	47
Gambar 3. 1.	Batang $AB$ dalam solenoida. Gambar 3. 2. Kurva $H$ dan $B$ .....	49
Gambar 3. 3.	Satu siklus magnetisasi suatu bahan magnet.....	50

Gambar 3. 4.	Bentuk loop histeresis bergantung pada sifat magnetik material. ....	53
Gambar 3. 5.	Bahan feromagnetik banyak digunakan dalam peralatan listrik dan komunikasi.....	54
Gambar 3. 6.	Beragam bentuk magnet.....	60
Gambar 3. 7.	Gaya tarik di antara dua kutub <b>U</b> dan <b>S</b> .....	60
Gambar 3. 8.	Sistem pengapian mesin mobil. ....	62
Gambar 3. 9.	Perilaku magnet ac teoretis untuk fluks dalam inti feromagnetik. ....	63
Gambar 3. 10.	Loop histeresis tipikal ketika arus ac diterapkan. ....	64
Gambar 3. 11.	(a) Domain magnetik berorientasi secara acak. (b) Domain magnet berbaris di hadapan medan magnet eksternal. ....	65
Gambar 3. 12.	Arus eddy dan laminasi inti. ....	67
Gambar 4. 1.	Perubahan defleksi galvanometer akibat perubahan medan magnet.....	70
Gambar 4. 2.	Konduktor yang digerakkan dalam medan magnet. ....	71
Gambar 4. 3.	Inti magnet sederhana. ....	72
Gambar 4. 4.	(a) Rangkaian listrik sederhana. (b) Rangkaian magnetik analog ke inti transformator. ....	74
Gambar 4. 5.	Menentukan polaritas sumber gaya gerak magnet dalam rangkaian magnet. ....	76
Gambar 4. 6.	Inti magnet dengan $N$ lilitan kawat. ....	77
Gambar 4. 7.	Analogi rangkaian listrik dengan rangkaian magnetik. ....	79
Gambar 4. 8.	Efek <i>fringing</i> medan magnet pada celah udara. Perhatikan peningkatan luas penampang dari celah udara dibandingkan dengan luas penampang logam.....	81
Gambar 4. 9.	(a) Inti feromagnetik dari soal diatas. (b) Rangkaian magnet yang sesuai dengan (a). ....	83
Gambar 4. 10.	(a) Inti feromagnetik dari contoh diatas. (b) Rangkaian magnet yang sesuai dengan (a). ....	85

Gambar 4. 11.	(a) Diagram sederhana dari rotor dan stator untuk motor dc. (b) Rangkaian magnet yang sesuai dengan (a). ....	87
Gambar 4. 12.	(a) Kurva magnetisasi dc untuk inti feromagnetik. (b) Kurva magnetisasi dinyatakan dalam kerapatan fluks, B dan intensitas magnetisasi, H. ....	88
Gambar 4. 13.	Kurva magnetisasi terperinci untuk sepotong baja biasa. ....	90
Gambar 4. 14.	Pengaruh ukuran ekskursi gaya gerak otomotif terhadap besarnya kerugian histeresis. ....	91
Gambar 4. 15.	Arti dari <b>hukum Lenz</b> : (a) Sebuah kumparan yang menutupi fluks magnet yang meningkat: (b) Menentukan polaritas tegangan yang dihasilkan. ....	92
Gambar 4. 16.	Penentuan polaritas tegangan terminal pada inti magnet. ....	94
Gambar 4. 17.	Aturan tangan kanan. ....	95
Gambar 4. 18.	Mesin dc linier, dimana medan magnet mengarah ke dalam halaman. ....	97
Gambar 4. 19.	(a) Aturan Tangan Kanan Fleming; dan (b) Aturan tangan kanan datar. ....	100
Gambar 4. 20.	Prinsip pembangkitan listrik. ....	102
Gambar 4. 21.	Konduktor <i>A</i> berada dalam medan magnet seragam. ....	103
Gambar 4. 22.	Sebuah batang konduktor <i>AB</i> kontak dengan rel logam <i>AD</i> dan <i>BC</i> dalam medan magnet seragam yang tegak lurus terhadap bidang <i>ABCD</i> . ....	105
Gambar 4. 23.	Dua kumparan A dan B yang saling berdekatan, kumparan A dihubungkan ke baterai, saklar S, dan resistor variabel R. ....	107
Gambar 4. 24.	Baterai dihubungkan ke B dan voltmeter melintasi A. ....	107
Gambar 4. 25.	EMF induksi diri timbul karena arus mengalir dalam kumparan berubah, sehingga fluks yang timbul juga akan berubah. ....	107
Gambar 4. 26.	Arah arus berlawanan (hukum Lenz) akan seperti menentang setiap perubahan aliran fluks, yang penyebab utama timbulnya fluks. ....	108

Gambar 4. 27.	Inti feromagnetik dengan kedalaman inti 5 cm.....	110
Gambar 5. 1.	Transformator. ....	112
Gambar 5. 2.	Transformator: (a). 3 fasa dan (b). 1 fasa.....	112
Gambar 5. 3.	Tampak potongan dari transformator distribusi tipe proteksi-diri dengan ukuran 2 sampai 25 kVA, 7200:240/120 V. ....	113
Gambar 5. 4.	Transformator 3 fasa 660-MVA 50-Hz digunakan sebagai penaik tegangan generator dari 20 kV menjadi tegangan transmisi 405 kV.....	113
Gambar 5. 5.	Transformator ideal.....	115
Gambar 5. 6.	Simbol transformator 1 fasa.....	115
Gambar 5. 7.	Simbol transformator 3 fasa.....	115
Gambar 5. 8.	Lambang transformator <i>step-up</i> .....	116
Gambar 5. 9.	Skema transformator <i>step-down</i> .....	116
Gambar 5. 10.	Skema auto transformator. ....	117
Gambar 5. 11.	Skema autotransformator variabel. ....	117
Gambar 5. 12.	Konstruksi transformator tipe inti. ....	118
Gambar 5. 13.	Konstruksi transformator tipe cangkang. ....	119
Gambar 5. 14.	Inti transformator. ....	119
Gambar 5. 15.	Inti transformator tipe inti. ....	120
Gambar 5. 16.	Inti transformator tipe cangkang. ....	120
Gambar 5. 17.	Kumparan transformator. ....	121
Gambar 5. 18.	Tangki transformator.....	121
Gambar 5. 19.	Bushing transformator. ....	122
Gambar 5. 20.	Minyak transformator. ....	122
Gambar 5. 21.	Kertas isolasi transformator. ....	123
Gambar 5. 22.	Penggunaan transformator. ....	123
Gambar 5. 23.	Transformator daya. ....	123

Gambar 5. 24.	Transformator tegangan ekstra tinggi (TET). .....	124
Gambar 6. 1.	Transformator (a) <i>step up</i> , dan (b) <i>step down</i> . .....	127
Gambar 6. 2.	Transformator sisi primer dan sekunder. ....	127
Gambar 6. 3.	Bentuk gelombang tegangan, arus dan fluks pada sebuah transformator.....	127
Gambar 6. 4.	Siklus fluks sinusoidal lengkap.....	129
Gambar 6. 5.	Tegangan $V_1$ pada sisi primer dan tegangan $V_2$ pada sisi sekunder.....	130
Gambar 6. 6.	Prinsip transformator <i>step-up</i> dan <i>step-down</i> .....	131
Gambar 6. 7.	Transformator ideal.....	131
Gambar 7. 1.	Diagram fasor kondisi tanpa beban dari transformator.....	140
Gambar 7. 2.	Transformator secara praktis dengan beban.....	141
Gambar 7. 3.	Rangkaian listrik dari trafo berbeban.....	143
Gambar 7. 4.	Rangkaian sekunder trafo ditransfer ke primer.....	144
Gambar 7. 5.	Rangkaian ekivalen yang sebenarnya dari transformator. ...	145
Gambar 7. 6.	Rangkaian ekivalen pendekatan dari transformator.....	147
Gambar 7. 7.	Rangkaian ekivalen pendekatan dari trafo dengan mengabaikan arus beban nol. ....	148
Gambar 7. 8.	(a) Rangkaian ekivalen trafo mengacu pada sisi primer. (b) Rangkaian ekivalen trafo mengacu pada sisi sekunder. .	149
Gambar 7. 9.	<b>Rangkaian ekivalen pendekatan</b> dari transformator ditinjau dari sisi primer. ....	150
Gambar 7. 10.	Parameter sisi primer diubah menjadi parameter sisi sekunder .....	151
Gambar 7. 11.	Rangkaian ekivalen pendekatan transformator setelah perhitungan $Z_L + Z_{e2}$ dan diparalelkan dengan $Z_o'$ .....	152
Gambar 7. 12.	Rangkaian ekivalen transformator. ....	154
Gambar 7. 13.	Rangkaian ekivalen transformator dilihat dari sisi sekunder. ....	155

Gambar 7. 14.	(a). Rangkaian ekivalen yang sebenarnya dari trafo, dan ....	155
Gambar 7. 15.	Rangkaian ekivalen trafo disederhanakan.....	156
Gambar 7. 16.	Rangkaian pengujian beban nol dari trafo. ....	158
Gambar 7. 17.	Rangkaian pengujian hubung singkat trafo.....	159
Gambar 7. 18.	Untai ekivalen trafo dalam keadaan hubung singkat. ....	160
Gambar 7. 19.	Rangkaian ekivalen trafo dari hasil pengujian beban nol dan hubung singkat. ....	162
Gambar 8. 1.	Stator dan rotor motor induksi. ....	168
Gambar 8. 2.	Konstruksi stator dengan alur kumparan. ....	169
Gambar 8. 3.	Rotor sangkar dari motor induksi. ....	170
Gambar 8. 4.	Jenis rotor sangkar (atas) dan rotor belitan (bawah). ....	170
Gambar 8. 5.	Rotor belitan dari motor induksi. ....	170
Gambar 8. 6.	Motor induksi berdasarkan jenis rotor. ....	171
Gambar 8. 7.	Motor induksi 3 fasa. ....	171
Gambar 8. 8.	Rangkaian rotor motor induksi. ....	174
Gambar 9. 1.	Rangkaian rotor motor induksi. ....	177
Gambar 9. 2.	Rangkaian listrik motor induksi.....	178
Gambar 9. 3.	Rangkaian rotor motor induksi yang dilihat/dipindahkan ke sisi stator.....	179
Gambar 9. 4.	Rangkaian ekivalen yang sebenarnya dari motor induksi....	180
Gambar 9. 5.	Rangkaian ekivalen pendekatan dari motor induksi. ....	185
Gambar 9. 6.	Tingkatan daya pada motor induksi.....	186
Gambar 9. 7.	Percobaan beban nol. ....	193
Gambar 9. 8.	Rangkaian ekivalen pada waktu beban nol. ....	194
Gambar 9. 9.	Diagram karakteristik beban nol.....	194
Gambar 9. 10.	Diagram karakteristik hubung singkat. ....	197
Gambar 9. 11.	Rangkaian ekivalen hubung singkat. ....	197
Gambar 10. 1.	Motor arus searah (dc). ....	202

Gambar 10. 2.	Stator dan rotor motor dc. ....	203
Gambar 10. 3.	Konstruksi motor arus searah (dc). ....	204
Gambar 10. 4.	Konstruksi motor arus searah (dc) bagian stator. ....	204
Gambar 10. 5.	Bagian-bagian rotor mesin arus searah. ....	204
Gambar 10. 6.	Konstruksi rotor motor arus searah (dc). ....	205
Gambar 10. 7.	Sikat dan komponen sikat. ....	205
Gambar 10. 8.	Konstruksi kutub dan penempatannya. ....	206
Gambar 10. 9.	Sikat pada motor dc. ....	207
Gambar 10. 10.	Inti jangkar yang berlapis-lapis. ....	208
Gambar 10. 11.	Komutator. ....	208
Gambar 10. 12.	Motor dc sederhana. ....	210
Gambar 10. 13.	Medan magnet yang membawa arus mengelilingi konduktor. ....	211
Gambar 10. 14.	Medan magnet mengelilingi konduktor dan diantara kutub. ....	211
Gambar 10. 15.	Reaksi garis fluks. ....	211
Gambar 10. 16.	Prinsip kerja motor arus searah. ....	213
Gambar 10. 17.	Kaidah tangan kanan. ....	213
Gambar 10. 18.	Prinsip perputaran motor arus searah. ....	214
Gambar 10. 19.	Aturan tangan kiri untuk prinsip kerja motor dc. ....	214
Gambar 10. 20.	Komponen-komponen konstruksi motor linier. ....	216
Gambar 11. 1.	Rangkaian ekuivalen motor arus searah berpenguatan bebas. ....	217
Gambar 11. 2.	Rangkaian ekuivalen motor arus searah shunt. ....	218
Gambar 11. 3.	Rangkaian ekuivalen motor arus searah seri. ....	219
Gambar 11. 4.	Rangkaian ekuivalen motor arus searah kompon pendek. ....	221
Gambar 11. 5.	Rangkaian ekuivalen motor arus searah kompon panjang. ....	221
Gambar 11. 6.	Kurva karakteristik torsi terhadap arus jangkar untuk motor ( $T$ vs $I_a$ ) dari berbagai motor arus searah. ....	232
Gambar 11. 7.	Kurva karakteristik kecepatan terhadap arus	

	jangkar ( $N$ vs $Ia$ ) dari berbagai motor arus searah. ....	234
Gambar 11. 8.	Kurva karakteristik kecepatan motor arus searah shunt terhadap hp output yang dianggap linier (garis lurus). ....	235
Gambar 11. 9.	Hubungan motor sistem Ward Leonard. ....	239
Gambar 11. 10.	Rangkaian ekivalen sistem Ward Leonard. ....	239
Gambar 12. 1.	Generator arus searah. ....	246
Gambar 12. 2.	Komponen-komponen generator arus searah. ....	246
Gambar 12. 3.	Tampilan irisan dari generator arus searah. ....	246
Gambar 12. 4.	Badan ( <i>body</i> ) generator arus searah. Perhatikan jalannya garis-garis gaya magnit. ....	247
Gambar 12. 5.	a). Pemasangan komutator. b). segmen komutator. ....	249
Gambar 12. 6.	Jangkar dan lilitannya. ....	249
Gambar 12. 7.	a). Jangkar beralur. b). Lempeng plat jangkar. ....	250
Gambar 12. 8.	Kumparan jangkar. ....	251
Gambar 12. 9.	Loop kawat sederhana yang berputar diantara permukaan kutub. (a) tampilan perspektif; (b) terlihat garis-garis gaya dari kutub $\mathbf{U}$ menuju kutub $\mathbf{S}$ ; (c) tampilan bagian atas dari loop kawat penghantar; dan (d) tampilan depan. ....	251
Gambar 12. 10.	Cara menentukan persamaan tegangan induksi pada loop. ....	252
Gambar 12. 11.	Tegangan keluaran pada loop dari Gambar 12.10. ....	252
Gambar 12. 12.	Cara mendapatkan tegangan dc menggunakan komutator dan sikat. (a) tampilans perspektif; (b) tegangan keluaran yang dihasilkan. ....	253
Gambar 12. 13.	Cara mendapatkan persamaan torsi induksi pada loop konduktor. ....	255
Gambar 12. 14.	Hukum Tangan Kanan Fleming. ....	256
Gambar 12. 15.	Rangkaian ekivalen generator arus searah berpenguatan bebas. ....	258
Gambar 12. 16.	Rangkain ekivalen generator arus searah shunt. ....	260
Gambar 12. 17.	Rangkaian ekivalen generator arus searah seri. ....	262

Gambar 12. 18.	Rangkaian ekivalen generator arus searah kompon pendek.	264
Gambar 12. 19.	Rangkaian ekivalen generator arus searah kompon panjang.....	266
Gambar 12. 20.	Rangkaian ekivalen pengujian beban nol generator arus searah.....	269
Gambar 12. 21.	Kurva karakteristik saturasi beban nol generator arus searah. ....	269
Gambar 12. 22.	Kurva karakteristik generator arus searah pada waktu beban nol sebagai fungsi dari putaran dan arus medan konstan. ....	270
Gambar 12. 23.	Kurva karakteristik generator arus searah shunt waktu dibebani.....	271
Gambar 12. 24.	Kurva karakteristik generator arus searah dari berbagai jenis kompon waktu dibebani. ....	273
Gambar 12. 25.	Kurva karakteristik generator arus searah seri waktu dibebani.....	274
Gambar 12. 26.	Stator dan rotor mesin dc.....	274
Gambar 13. 1.	(a) Generator ac satu fasa dua kutub, dan (b) Generator ac tiga fasa dua kutub.....	278
Gambar 13. 2.	Hubungan generator dan turbin pada PLTA. ....	280
Gambar 13. 3.	Konstruksi generator sinkron.....	281
Gambar 13. 4.	Bentuk-bentuk alur.....	282
Gambar 13. 5.	Lilitan kumparan satu lapis generator sinkron tiga fasa. ....	282
Gambar 13. 6.	Generator sinkron 4 kutub lilitan kumparan satu lapis. ....	283
Gambar 13. 7.	Hubungan lilitan kumparan pada fasa <i>R</i> , <i>Y</i> dan <i>B</i> dengan ujung kumparan digabungkan membentuk hubungan <i>Y</i> .....	283
Gambar 13. 8.	Kumparan lapis ganda stator mesin sinkron 4 kutub, 24 slot. ....	285
Gambar 13. 9.	Grup lapis ganda kumparan stator satu fasa dihubungkan bersama pada kutub-kutub yang berlawanan secara bergantian.....	285

Gambar 13. 10.	Kumparan lapis ganda generator sinkron tiga fasa. ....	286
Gambar 13. 11.	Rotor kutub menonjol. ....	287
Gambar 13. 12.	Rotor mesin sinkron 4 kutub, jenis kutub menonjol. ....	288
Gambar 13. 13.	Mesin sinkron lengkap dengan eksiter. ....	288
Gambar 13. 14.	Rotor kutub silindris. ....	289
Gambar 13. 15.	Bentuk sederhana konstruksi generator sinkron. ....	289
Gambar 13. 16.	Bentuk konstruksi stator pada generator sinkron. ....	289
Gambar 13. 17.	Rotor silinder dengan kumparan dan slot kumparan. ....	290
Gambar 13. 18.	Generator sinkron jenis rotor silinder 3 fasa, 31.250 kVA, 14.440 volt, faktor daya 0,8, 3600 rpm, dengan turbin dan eksiter. ....	291
Gambar 13. 19.	Rangkaian kumparan jangkar di stator mesin sinkron. ....	291
Gambar 13. 20.	Bentuk konstruksi rotor <i>salient pole</i> (kutub menonjol) pada generator sinkron. ....	292
Gambar 13. 21.	Bentuk konstruksi rotor kutub silindris pada generator sinkron. ....	292
Gambar 13. 22.	Kisar atau gawang lilitan jangkar. ....	294
Gambar 13. 23.	Kaidah tangan kanan. ....	295
Gambar 13. 24.	Kumparan jangkar pada rotor berputar di sekitar medan magnet yang dihasilkan stator. ....	296
Gambar 13. 25.	Proses terbentuknya gelombang ac pada generator sinkron. ....	297
Gambar 13. 26.	Diagram fungsi pengaturan arus medan pada alternator. ....	300
Gambar 13. 27.	Karakteristik hubungan pengaruh arus medan terhadap fluks dan $E_a$ pada alternator. ....	301
Gambar 13. 28.	Model reaksi jangkar, (a) $I_a$ sefasa dengan $V_t$ , (b) $I_a$ terdahulu dari $V_t$ , dan (c) $I_a$ terbelakang dari $V_t$ . ....	303
Gambar 13. 29.	Rangkaian ekuivalen generator sinkron. ....	305
Gambar 13. 30.	Penyederhanaan rangkaian generator sinkron. ....	306
Gambar 13. 31.	Rangkaian ekuivalen generator sinkron tiga fasa. ....	307

Gambar 13. 32.	Rangkaian ekivalen kumparan stator tiga fasa generator sinkron (a). hubungan – Y dan (b). hubungan – $\Delta$ .....	307
Gambar 13. 33.	Diagram fasor generator sinkron: (a). faktor daya <i>lagging</i> , (b). faktor daya <i>leading</i> , dan (c). faktor daya <i>satu</i> . .....	309
Gambar 13. 34.	Segitiga daya. ....	310
Gambar 13. 35.	Diagram vektor dari generator serempak berbeban non induktif. ....	312
Gambar 13. 36.	Diagram vektor dari generator serempak berbeban induktif. ....	313
Gambar 13. 37.	Diagram vektor dari generator sinkron yang berbeban kapasitif. ....	313
Gambar 13. 38.	Karakteristik tegangan terminal dari generator serempak versus arus beban dengan berbagai faktor beban. ....	315
Gambar 13. 39.	Diagram aliran daya generator sinkron. ....	318

# **BAB 1**

## **SISTEM TENAGA LISTRIK**

### **1.1 Pendahuluan**

Saat ini sistem tenaga listrik memegang peranan penting dalam kehidupan sehari-hari, khususnya dalam bidang industri dan pabrik yakni sebagai tenaga penggerak mesin-mesin produksi, penerangan dan sebagainya.

Disamping itu dalam kehidupan rumah tangga yang sudah terjangkau oleh jaringan listrik, energi atau tenaga listrik ini sudah mulai dirasakan sebagai salah satu kebutuhan pokok disamping kebutuhan pangan, sandang dan papan.

Dalam sistem tenaga listrik dikenal dua jenis arus listrik yaitu:

1. Arus arus searah (*direct current, dc*).
2. Arus bolak-balik (*alternating current, ac*).

### **1.2 Dasar Sistem Tenaga Listrik**

Dalam teknik tenaga listrik, baik itu arus searah maupun arus bolak-balik, dikenal sistem pengadaan energi listrik sebagai berikut:

1. Pembangkit

Sebagai sumber tenaga listrik yang antara lain: PLTA, PLTU, PLTD, PLTN, PLTS, PLTB dan sebagainya.

2. Transmisi

Sebagai jaringan untuk menyalurkan tenaga listrik dari pembangkit ke beban atau ke jaringan distribusi.

Saluran transmisi akan mengalami rugi-rugi tenaga, maka untuk mengatasi hal tersebut energi listrik yang akan dikirim dari pusat pembangkit ke pusat beban harus ditransmisikan dengan tegangan tinggi maupun tegangan ekstra tinggi.

Saluran Transmisi Tegangan Tinggi PLN kebanyakan mempunyai tegangan 66 KV, 150 KV dan 500 KV. Khusus untuk tegangan 500 KV dalam praktek saat ini disebut sebagai tegangan ekstra tinggi.

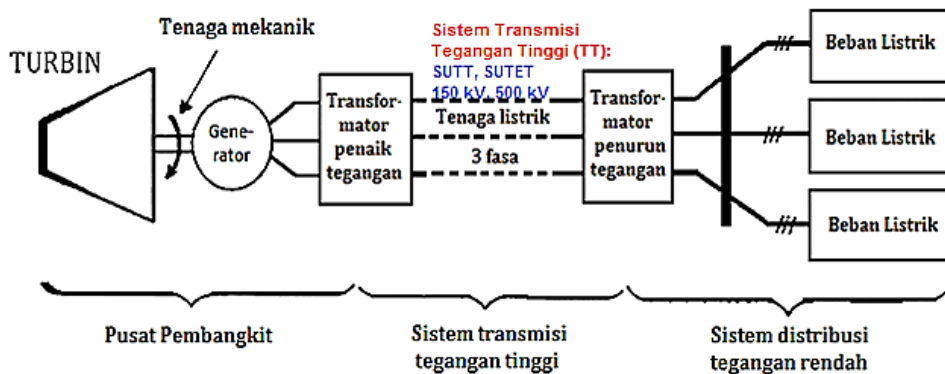
### 3. Distribusi

Sistem distribusi berfungsi menyalurkan tenaga listrik ke konsumen yang berupa pabrik, industri, perumahan dan sebagainya. Transmisi tenaga dengan tegangan tinggi maupun ekstra tinggi pada saluran transmisi diubah pada gardu induk menjadi tegangan menengah atau tegangan distribusi primer, yang selanjutnya diturunkan lagi menjadi tegangan untuk konsumen.

Tegangan Distribusi primer yang dipakai PLN adalah : 20 kV, 12 kV dan 6 kV. Kecenderungan saat ini menunjukkan bahwa tegangan distribusi primer PLN yang berkembang adalah 20 kV.

### 4. Beban listrik.

Konsumen atau pemakai energi listrik, seperti beban perumahan (residensial), pabrik atau industri, perkantoran dan sebagainya. Umumnya di Indonesia, beban konsumen listrik 1 fasa 220 volt atau 3 fasa 380 volt yang merupakan jaringan tegangan rendah (JTR) pada sistem distribusi daya listrik PLN.



Gambar 1. 1. Sistem tenaga listrik.

Sistem Pembangkitan Tenaga Listrik berfungsi membangkitkan energi listrik melalui berbagai macam pembangkit tenaga listrik.

Pada Pembangkit Tenaga Listrik ini sumber-sumber energi alam dirubah oleh penggerak mula menjadi energi mekanis yang berupa kecepatan atau putaran, selanjutnya energi mekanis tersebut diubah menjadi energi listrik oleh generator.

Sumber-sumber energi alam tersebut dapat berupa:

- Bahan bakar yang berasal dari fosil: batubara, minyak bumi, gas alam.
- Bahan galian: uranium, thorium.
- Energi terbarukan: tenaga air, yang penting adalah tinggi jatuh air dan debitnya; tenaga angin, panas bumi, energi ombak dan sebagainya.

Pembangkit energi listrik berdasarkan sumber energi, dibagi atas:

- a. Pembangkit sumber energi terbarukan (*renewable energy*):
  1. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).
  2. Pembangkit Listrik Tenaga Angin/Bayu (PLTB).
  3. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).
  4. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP).
- b. Pembangkit dengan sumber tak terbarukan:
  1. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD).
  2. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).
  3. Pembangkit Listrik Tenaga Batu Bara.

Pembangkit tenaga listrik digolongkan berdasarkan prinsip kerja:

- a. Pembangkit non termis:
  1. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).
  2. Pembangkit Listrik Tenaga Angin/Bayu (PLTB).
  3. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).
- b. Pembangkit termis:
  1. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).
  2. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD).
  3. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).
  4. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP).



(a)



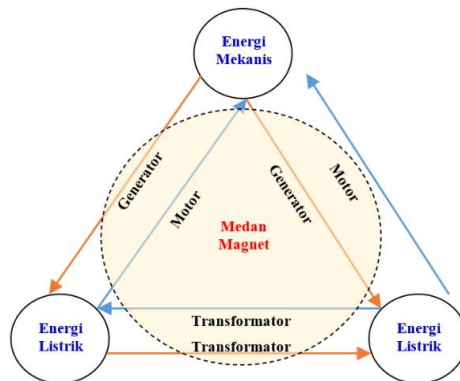
(b)

Gambar 1. 2. Transmisi listrik tegangan tinggi.

### 1.3 Sistem Konversi Energi Listrik

Dalam sistem tenaga listrik dikenal peralatan yang mengubah energi listrik, baik dari energi listrik ke energi mekanis, maupun sebaliknya, serta mengubah energi listrik dari rangkaian atau jaringan yang satu menjadi energi listrik yang lain pada rangkaian atau jaringan berikutnya, seperti diperlihatkan Gambar 1.3.

Konversi energi baik dari energi listrik menjadi energi mekanik (motor) maupun sebaliknya dari energi mekanik menjadi energi listrik (generator) berlangsung melalui medium medan magnet. Energi yang akan diubah dari satu sistem ke sistem lainnya. sementara akan tersimpan pada medium medan magnet untuk kemudian dilepaskan menjadi energi sistem lainnya. Dengan demikian medan magnet di sini selain berfungsi sebagai tempat penyimpanan energi juga sekaligus sebagai medium untuk mengkopel proses perubahan energi.



Gambar 1. 3. Mekanisme konversi energi pada motor, generator dan transformator melalui medium medan magnet.

Dalam Gambar 1.3 diatas, peralatan atau piranti yang digunakan secara singkat dapat diterangkan sebagai berikut:

1. Generator, yakni piranti atau peralatan listrik yang dapat digunakan untuk mengubah energi mekanis menjadi energi listrik, dapat berupa generator arus searah maupun generator arus bolak-balik.
2. Motor, yakni piranti atau peralatan listrik yang dapat digunakan untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanis, dapat berupa motor arus searah maupun motor arus bolak-balik.
3. Transformator, yakni peralatan atau piranti listrik yang dapat digunakan untuk mengubah energi listrik dari suatu sistem ke energi listrik pada sistem yang lain (misalnya dari sistem transmisi ke sistem distribusi listrik), dengan cara menaikkan atau menurunkan tegangan keluaran (*output*) sesuai dengan tegangan sistem yang digunakan.
4. Medan magnet, merupakan media tempat mengubah bentuk energi baik dari energi mekanis diubah menjadi energi listrik menggunakan generator, maupun dari energi listrik diubah menjadi energi mekanis menggunakan motor dan, media transfer energi listrik ke energi listrik pada tegangan tertentu menggunakan transformator. Energi tersebut akan tersimpan pada medium medan magnet untuk kemudian dilepaskan menjadi energi sistem lainnya. Dengan demikian medan magnet di sini selain berfungsi sebagai tempat penyimpanan energi juga sekaligus sebagai medium untuk mengkopel proses perubahan energi.

Transformator terbagi atas:

- a. Transformator penaik tegangan (*step up transformer*) atau dapat disebut transformator daya.
- b. Transformator penurun tegangan (*step down transformer*) atau dapat disebut transformator distribusi.
- c. Transformator alat ukur.
- d. Transformator yang digunakan pada peralatan atau rangkaian elektronik, yaitu untuk memisahkan rangkaian yang satu dengan rangkaian yang lain.

Generator maupun motor dapat disebut mesin listrik, karena baik generator maupun motor terbagi atas generator dan motor arus searah dan

generator dan motor arus bolak-balik, sehingga mesin listrik juga dapat dibagi:

- a. Mesin listrik arus searah.
- b. Mesin listrik arus bolak-balik, termasuk transformator.

Mesin arus searah dapat dibagi atas:

- a. Berpenguatan bebas.
- b. Berpenguatan sendiri, terdiri atas: mesin *shunt*, mesin seri dan mesin kompon.

Mesin arus bolak-balik dapat dibagi atas:

- a. Mesin asinkron atau mesin tak serempak atau mesin induksi.
- b. Mesin sinkron atau mesin serempak.

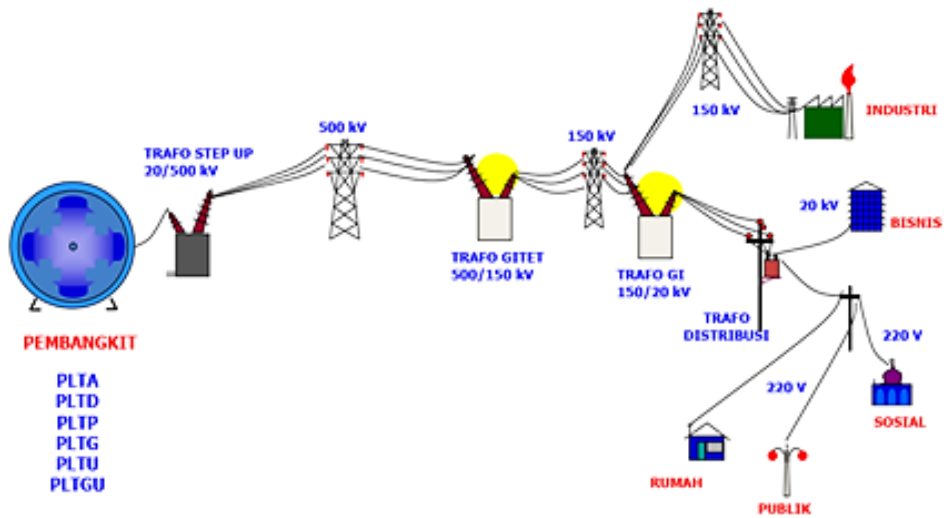
Dalam memahami mesin listrik tersebut terlebih dahulu harus mengetahui karakter medan magnet dan medan listrik, karena medan ini yang menjadi media tempat terjadinya perubahan energi listrik menjadi energi mekanik maupun sebaliknya dari energi menjadi diubah menjadi energi listrik atau dari energi listrik ke energi listrik itu sendiri.

#### **1.4 Elemen Sistem Tenaga Listrik**

Salah satu cara yang paling ekonomis, mudah, dan aman untuk mengirimkan energi adalah melalui bentuk energi listrik. Pada pusat pembangkit, sumber daya energi primer seperti bahan bakar fosil (minyak, gas alam, dan batubara), hidro, panas bumi, dan nuklir diubah menjadi energi listrik. Generator sinkron mengubah energi mekanis yang dihasilkan pada poros turbin menjadi energi listrik 3 fasa.

Melalui transformator penaik tegangan (step-up transformator) energi listrik ini kemudian dikirimkan melalui saluran transmisi bertegangan tinggi menuju pusat-pusat beban. Peningkatan tegangan dimaksudkan untuk mengurangi jumlah arus yang mengalir pada saluran transmisi. Dengan demikian saluran transmisi bertegangan tinggi akan membawa aliran arus yang rendah dan berarti mengurangi rugi panas (heat loss)  $I^2R$  yang menyertainya. Ketika saluran transmisi mencapai pusat beban, tegangan tersebut kembali diturunkan menjadi tegangan menengah, melalui transformator penurun tegangan (step-down transformator).

Di pusat-pusat beban yang terhubung dengan saluran distribusi, energi listrik ini diubah lagi menjadi bentuk-bentuk energi terpakai lainnya seperti energi mekanis (motor), penerangan, pemanas, pendingin, dan sebagainya. Elemen pokok sistem tenaga dapat dilihat pada Gambar 1.4.



Gambar 1. 4. Sistem tenaga listrik dari pembangkit, transmisi, distribusi hingga beban listrik.

### 1.5 Pusat Pembangkit dan Operasi Ekonomisnya

Pusat pembangkit berfungsi untuk mengkonversikan sumber daya energi primer menjadi energi listrik. Pusat pembangkit listrik konvensional mencakup:

- (1) Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU): minyak, gas alam, dan batubara.
- (2) Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA).
- (3) Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG).
- (4) Pusat Listrik Tenaga Diesel (PLTD).
- (5) Pusat Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP).
- (6) Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).

Di samping pembangkit listrik konvensional tersebut, saat ini tengah dikembangkan beberapa teknologi konversi untuk sumber daya energi baru seperti: biomassa, solar, limbah kayu, angin, gelombang laut, dan sebagainya.

Pembangkit listrik melalui cara magneto hidro dinamik (MHD) pada saat ini juga sedang memasuki tahap penelitian dan pengembangan yang intensif.

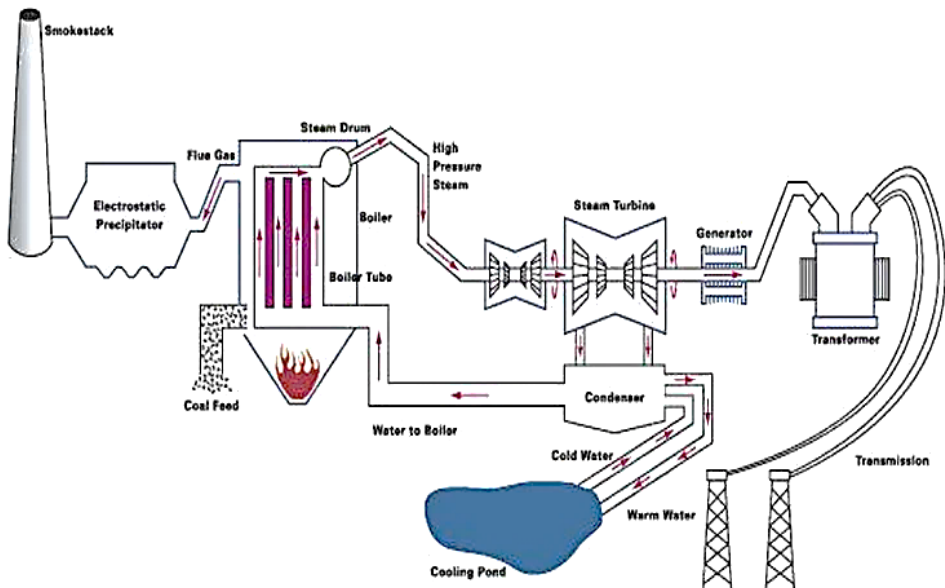
### **1.5.1 Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU)**

Pada pembangkit listrik ini, bahan bakar minyak, gas alam, atau batubara dipakai untuk membangkitkan panas dan uap pada boiler. Uap tersebut kemudian dipakai untuk memutar turbin yang dikopelkan langsung dengan sebuah generator sinkron. Setelah melewati turbin, uap yang bertekanan dan bertemperatur tinggi tadi muncul menjadi uap bertekanan dan bertemperatur rendah. Panas yang disadap oleh kondensor menyebabkan uap berubah menjadi air yang kemudian dipompakan kembali menuju boiler.

Siklus lengkap proses ini terlihat pada Gambar 1.5. Sisa panas yang dibuang oleh kondensor mencapai setengah jumlah panas semula yang masuk. Hal ini mengakibatkan efisiensi termodinamika suatu turbin uap bernilai lebih kecil dari 50%. Turbin uap dengan teknologi saat ini mencapai temperatur boiler sekitar 500° hingga 600°C dan temperatur kondensor antara 20° sampai 30°C.

Prinsip kerja PLTU pada prinsipnya adalah sebagai berikut:

1. Air dipanaskan dalam ketel uap (boiler) hingga menjadi uap yang bersuhu tinggi dan mempunyai tekanan yang cukup tinggi.
2. Uap tersebut kemudian dialirkan ke turbin uap untuk memutar turbin.
3. Uap yang keluar dari turbin yang tekanannya sudah relatif rendah dialirkan ke dalam pendingin (kondensator) agar mengembun kembali lagi menjadi air. Air yang dihasilkan dikembalikan lagi ke boiler untuk diuapkan kembali.



Gambar 1. 5. Siklus lengkap proses pembangkitan energi listrik PLTU.



Gambar 1. 6. Lokasi PLTU di pinggir pantai.

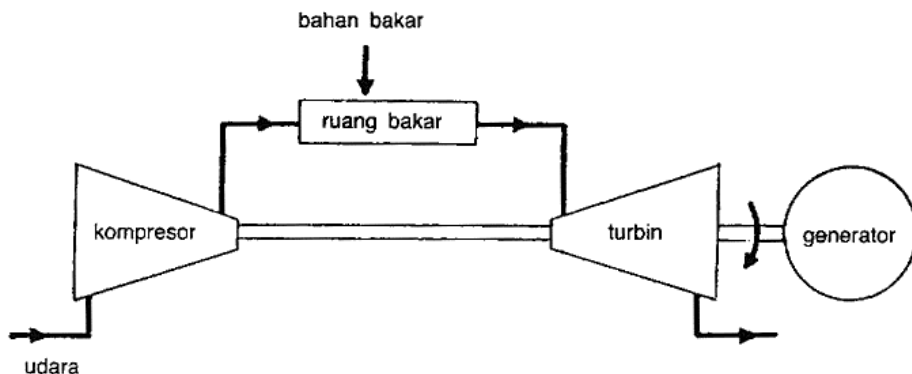


Gambar 1. 7. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).

### 1.5.2 Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG)

Seperti juga pada PLTD, PLTG atau turbin gas merupakan mesin dengan proses pembakaran dalam (*internal combustion*). Bahan bakar berupa minyak atau gas alam dibakar di dalam ruang pembakar (*combustor*). Udara yang memasuki kompresor setelah mengalami tekanan bersama-sama dengan bahan bakar disemprotkan ke ruang pembakar untuk melakukan proses pembakaran. Gas panas hasil pembakaran ini berfungsi sebagai fluida kerja yang memutar roda turbin bersudu yang terkopel dengan generator sinkron. Generator sinkron kemudian mengubah energi mekanis menjadi energi listrik (lihat Gambar 1.8).

Berbeda dengan PLTD, pada PLTG tidak terdapat bagian mesin yang bergerak translasi (bolak-balik) karena PLTG merupakan mesin yang bebas dari getaran. Meskipun temperatur turbin gas ( $1000^{\circ}\text{C}$ ) jauh lebih tinggi daripada temperatur turbin uap ( $538^{\circ}\text{C}$ ), namun efisiensi konversi termalnya hanya mencapai 20%-30%. Karena biaya modal yang rendah, serta biaya bahan bakar yang tinggi, maka PLTG berfungsi memikul beban puncak.

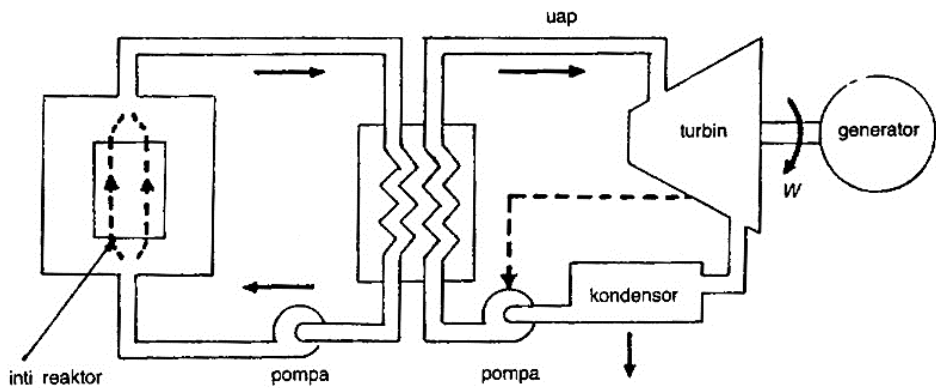


Gambar 1. 8. Skema pembangkitan energi listrik PLTG.

### 1.5.3 Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)

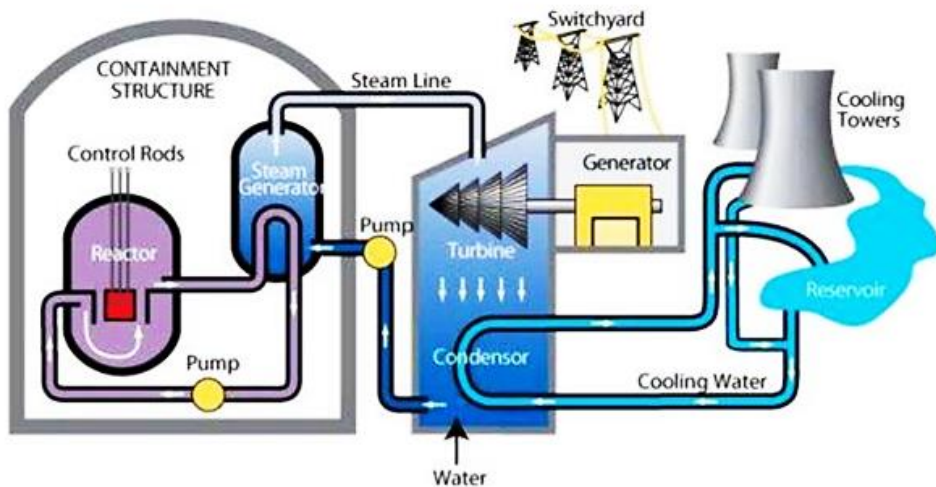
Pada reaktor air tekan (*pressurized water reactor*) terdapat dua rangkaian yang seolah-olah terpisah. Pada rangkaian pertama, bahan bakar uranium-235 yang diperkaya dan tersusun dalam pipa-pipa berkelompok, disuntut untuk menghasilkan panas dalam reaktor. Karena air dalam bejana penuh, maka tidak terjadi pembentukan uap, melainkan air menjadi panas dan bertekanan. Air panas yang bertekanan tersebut kemudian mengalir ke rangkaian kedua melalui suatu generator uap yang terbuat dari baja. Generator uap menghasilkan uap yang memutar turbin dan proses selanjutnya mengikuti siklus tertutup sebagaimana berlangsung pada turbin uap PLTU.

Keuntungan reaktor air tekan yang mempunyai dua rangkaian ini terletak pada pemisahan rangkaian pertama, yang merupakan reaktor radioaktif dari proses konversi turbin uap yang berlangsung pada rangkaian kedua. Dengan demikian, uap yang masuk ke dalam turbin dan kondensor merupakan uap bersih yang tidak tercemar radioaktif. PLTN yang mempunyai biaya modal tinggi dan biaya bahan bakar rendah, umumnya digunakan beroperasi untuk beban dasar (7000-8000 jam per tahun).



Gambar 1. 9. Skema pembangkitan energi listrik PLTN.

Prinsip kerja PLTN mirip dengan PLTU hanya saja energi yang digunakan untuk memanaskan air dalam boiler menggunakan hasil reaksi nuklir, yang berupa hasil ledakan dari bahan baku reaktor nuklir, salah satunya yaitu unsur uranium. Karena investasi yang mahal, sehingga lebih banyak dibangun dengan kapasitas besar.



Gambar 1. 10. Komponen-komponen PLTG.

#### 1.5.4 Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA)

Penggunaan tenaga air mungkin merupakan bentuk konversi energi tertua yang pernah dikenal manusia. Perbedaan vertikal antara batas atas

dengan batas bawah bendungan tempat beradanya turbin air, dikenal sebagai *tinggi terjun*.

Tinggi terjun ini mengakibatkan air yang mengalir akan memperoleh energi kinetik yang kemudian mendesak sudu-sudu turbin. Bergantung pada tinggi terjun dan debit air, dikenal 3 macam turbin, yaitu: Pelton, Francis, dan Kaplan. Karena tidak menggunakan bahan bakar, biaya operasi PLTA sangat rendah, namun hal ini dibarengi dengan biaya investasi yang sangat tinggi untuk konstruksi pekerjaan sipilnya.

Bergantung pada ketersediaan sumber energi air, PLTA dapat berfungsi untuk memikul beban puncak ataupun beban dasar. Sebagai sumber daya energi yang dapat pulih, sumber potensi tenaga air sangat menarik untuk dikembangkan. Tetapi pemanfaatannya secara luas sangat dibatasi oleh kondisi geografis setempat dan permasalahan lokasi yang biasanya jauh dari pusat beban, dengan potensi tenaga air yang tersebar di seluruh Indonesia sebesar 77.863 MW.

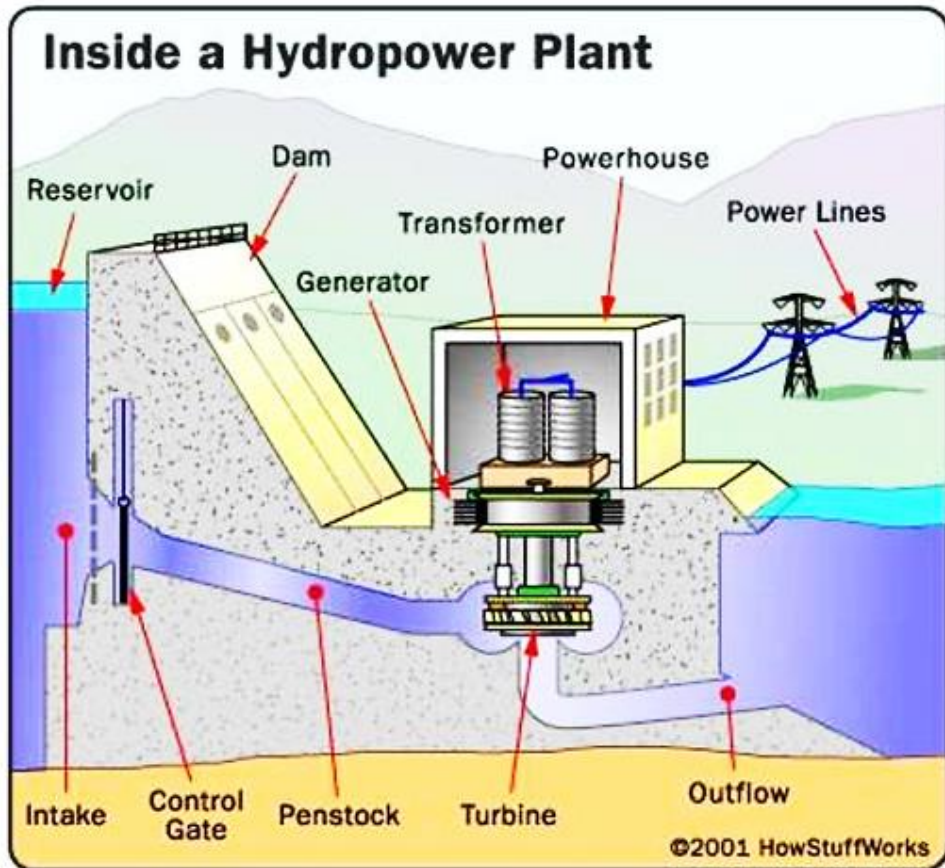
Dengan memperhatikan bahwa setiap jenis pusat pembangkit mempunyai perbedaan yang cukup berarti dilihat dari aspek biaya modal, biaya operasi, maupun efisiensinya, maka seorang insinyur listrik harus mampu memilih alternatif susunan gabungan pembangkitan (*generation-mix*) yang paling ekonomis untuk dioperasikan.

Mengingat beban bervariasi secara ekstrem dari saat ke saat dan bersamaan dengan itu penyediaan (*supply*) sistem pembangkit diharapkan selalu mencukupi kebutuhan beban yang berfluktuasi tadi, maka terdapat interelasi antara parameter ekonomis pusat-pusat pembangkit dengan dinamika beban.

Prinsip kerja PLTA secara garis besar dapat dilihat pada uraian berikut:

1. Air sungai yang mengalir ditampung di waduk sehingga mempunyai ketinggian tertentu. Di dekat waduk pada daerah yang lebih rendah dipasang turbin air.
2. Dari waduk air di alirkan ke turbin melalui pipa pesat. Aliran air diatur sesuai dengan kebutuhan turbin.
3. Air yang mengalir dengan tekanan tinggi digunakan untuk memutar turbin air.

Selanjutnya air yang keluar turbin dialitkan kembali ke sungai untuk keperluan pengairan atau untuk keperluan lain.



Gambar 1. 11. Prinsip kerja PLTA.

### 1.5.5 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH)

Secara teknis PLTMH memiliki tiga komponen utama yaitu air (hydro), turbin, dan generator. Prinsip kerja dari PLTMH sendiri pada dasarnya sama dengan PLTA hanya saja berbeda kapasitasnya atau besarnya. PLTMH pada prinsipnya memanfaatkan beda ketinggian atau sudut kemiringan dan jumlah debit air per detik yang ada pada saluran irigasi, sungai, maupun air terjun. Aliran air akan memutar turbin sehingga

akan menghasilkan energi mekanik. Energi mekanik turbin akan memutar generator dan generator menghasilkan listrik.



Gambar 1. 12. Skema sederhana PLTMH.



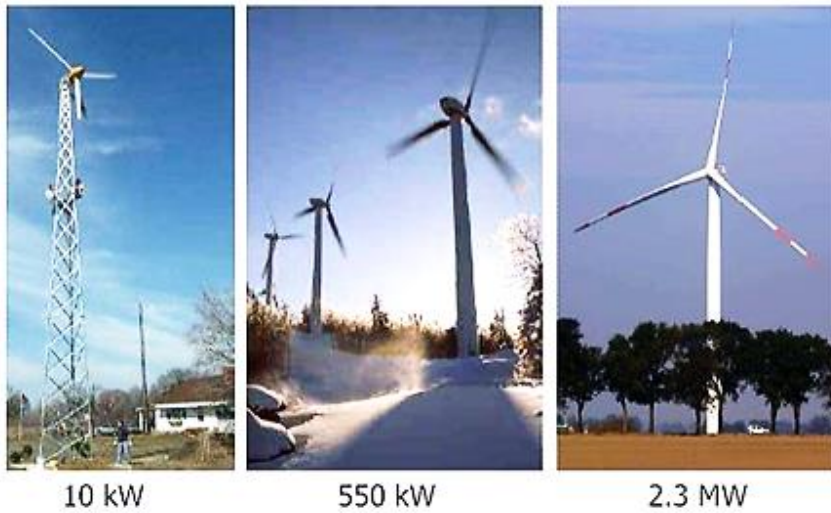
Gambar 1. 13. Contoh pemanfaatan PLTMH.

### 1.5.6 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (Angin)

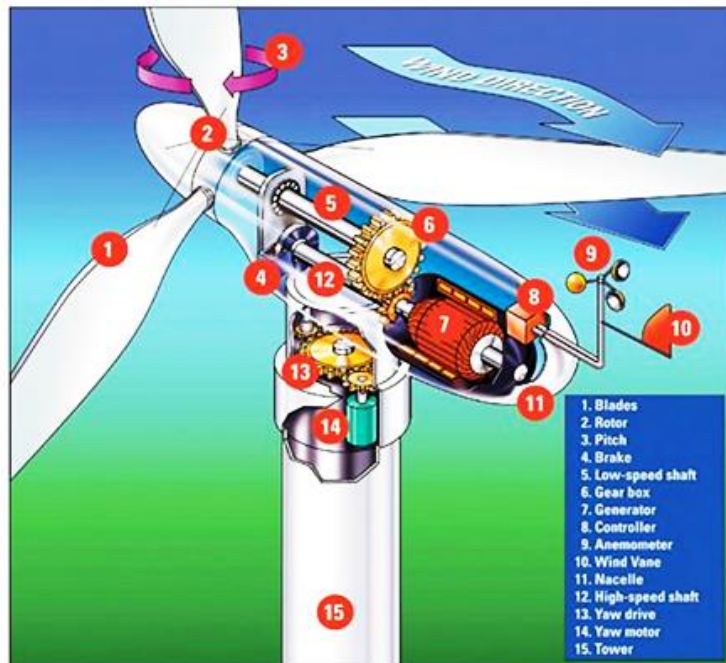
Prinsip kerja Pembangkit Listrik Tenaga Angin berdasarkan prinsip kerja kincir angin yang sangat sederhana yaitu:

1. Angin akan meniup bilah kincir angin sehingga bilah bergerak.
2. bilah kincir angin akan memutar poros didalam *nacelle*.
3. Poros dihubungkan ke gearbox, di gearbox kecepatan perputaran poros ditingkatkan dengan cara mengatur perbandingan roda gigi dalam gearbox.
4. Gearbox dihubungkan ke generator, dimana generator mengubah energi mekanik menjadi energi listrik.

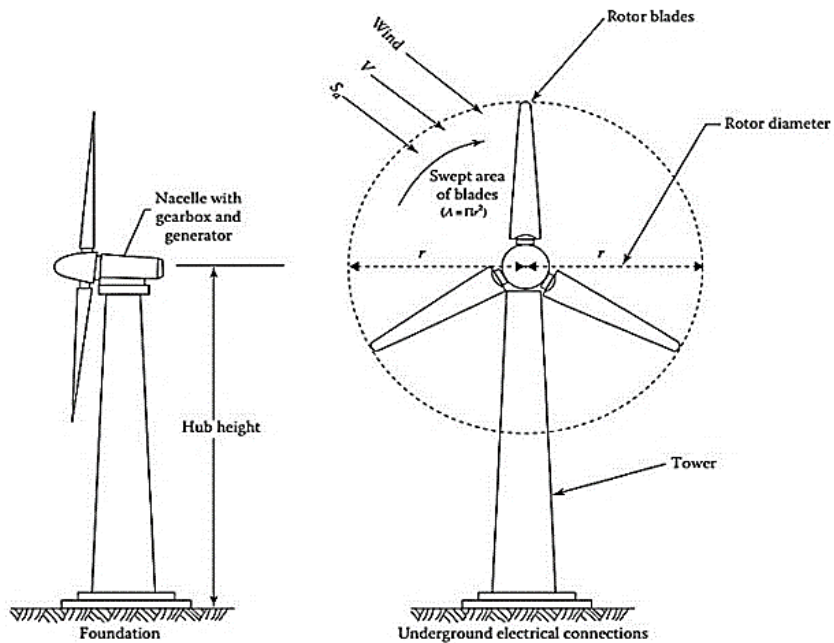
5. Dari generator, energi listrik menuju transformator untuk menaikkan tegangan, selanjutnya energi listrik didistribusikan ke konsumen.



Gambar 1. 14. Perkembangan teknologi energi angin.



Gambar 1. 15. Konstruksi dan komponen dari turbin energi angin.



Gambar 1. 16. Turbin energi angin tiga bilah (*blade*), sumbu mendatar.

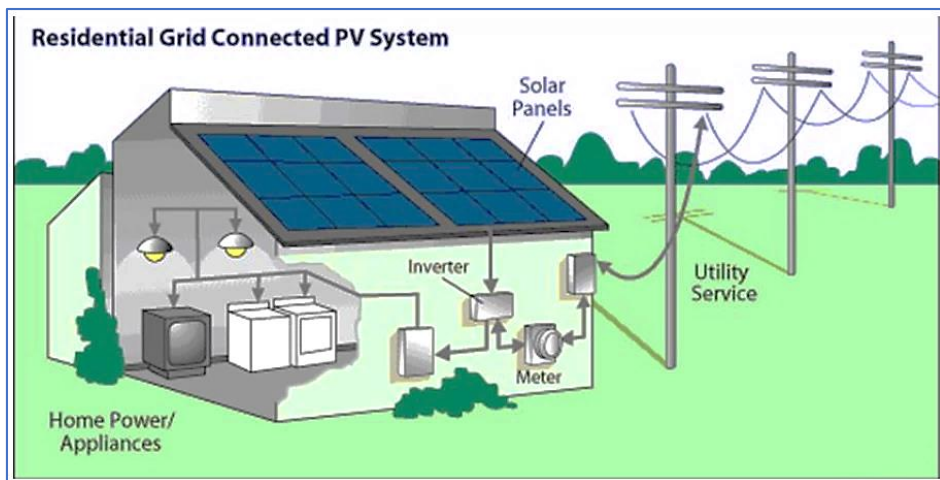


Gambar 1. 17. Beberapa contoh turbin energi angin yang digunakan di USA, Spanyol, Denmark dan Jerman.

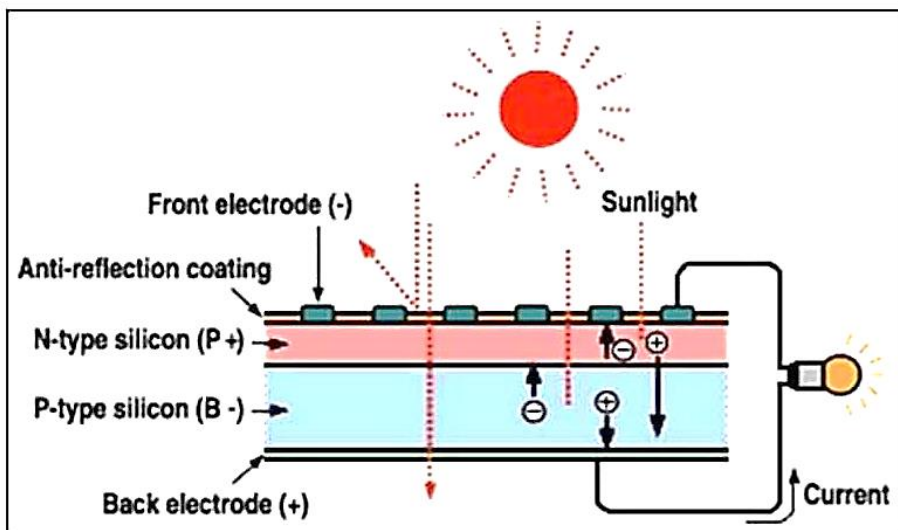
### 1.5.7 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Sel surya atau *solar cell* adalah suatu perangkat atau komponen yang dapat mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan

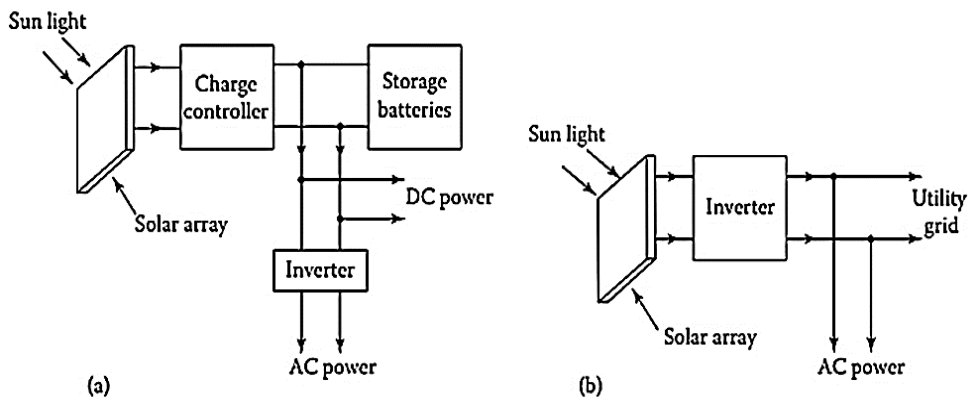
menggunakan prinsip efek *photovoltaic*. Yang dimaksud dengan efek *photovoltaic* adalah suatu fenomena dimana munculnya tegangan listrik karena adanya hubungan atau kontak dua elektroda yang dihubungkan dengan sistem padatan atau cairan saat mendapatkan energi cahaya. Oleh karena itu, Sel surya atau *solar cell* sering disebut juga dengan sel *photovoltaic* (PV). Efek *photovoltaic* ini ditemukan oleh Henri Becquerel pada tahun 1839.



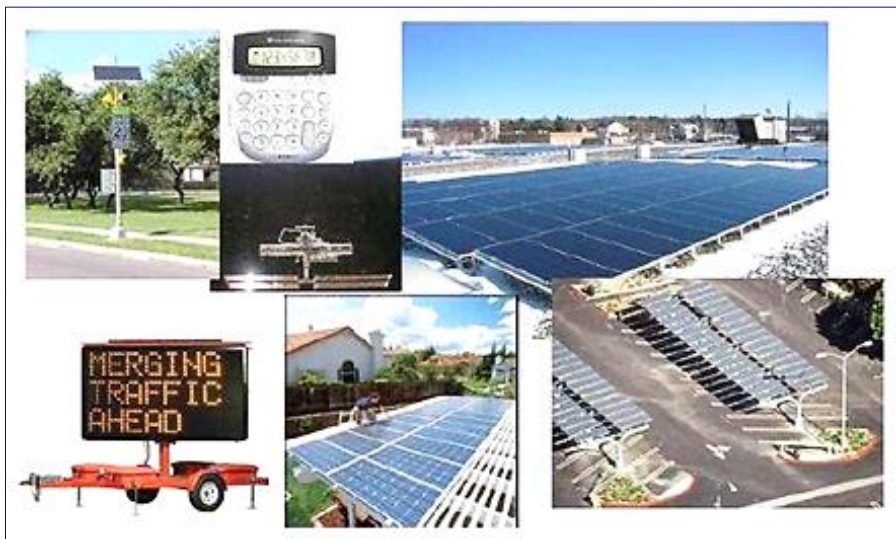
Gambar 1. 18. Sistem PV yang terhubung ke jaringan rumah.



Gambar 1. 19. Prinsip kerja dari sel *photovoltaic* (PV).



Gambar 1. 20. Dua konfigurasi dasar PLTS (a). Sistem mandiri (*stand-alone*), dan (b). Sistem *cogeneration* atau sistem penunjang ke sistem grid.



Gambar 1. 21. Beberapa contoh pemanfaatan PLTS.

### 1.6 Karakteristik Beban

Sistem tenaga listrik dirancang untuk dapat mengirim energi listrik dengan cara yang efisien dan aman kepada para langganan. Karakteristik dari permintaan energi listrik kadangkala membuat usaha tersebut sulit untuk dipenuhi. Meramalkan pertumbuhan beban dan usaha untuk memenuhi siklus beban harian dan beban tahunan secara memuaskan merupakan dua kesulitan yang harus diatasi.

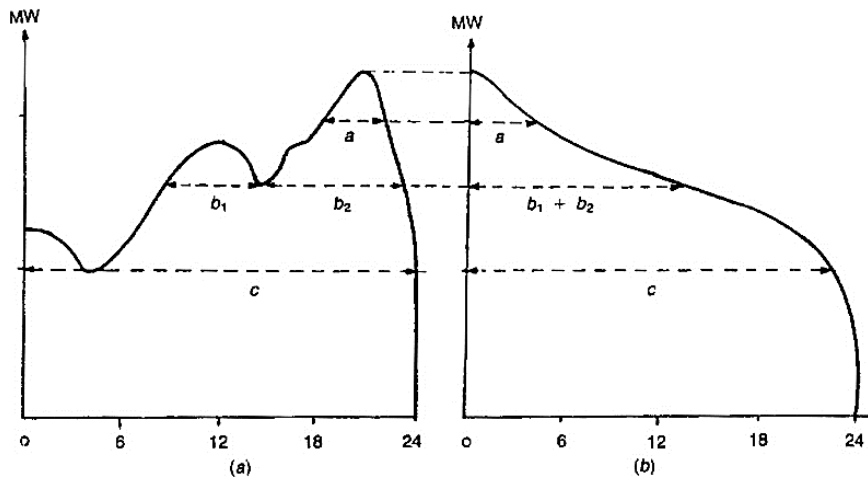
Pusat-pusat pembangkit yang tersedia harus selalu dapat memenuhi kebutuhan beban yang berubah-ubah tersebut. Meskipun pusat pembangkit dengan ukuran besar biasanya dianggap lebih ekonomis, namun jika tambahan daya yang diperlukan hanya sekadar untuk memenuhi beban puncak yang berlangsung beberapa jam, pembangkit ukuran kecil sudah cukup memadai untuk melayaninya. Karena itu, seorang insinyur tidak saja harus memperkirakan pertumbuhan beban dari tahun ke tahun, tapi juga harus mampu memperhitungkan secara ekonomis kebutuhan beban harian yang selalu berubah-ubah.

Karakteristik perubahan besarnya daya yang diterima oleh beban sistem tenaga setiap saat dalam suatu interval hari tertentu dikenal sebagai ***Kurva Beban Harian***.

Penggambaran kurva ini dilakukan dengan mencatat besarnya beban setiap jam melalui pencatatan Mega Watt-meter yang terdapat di gardu induk. Sumbu vertikal menyatakan skala beban dalam satuan MW, sedangkan sumbu horizontal menyatakan skala pencatatan waktu dalam 24 jam. Dengan demikian luas daerah di bawah kurva merupakan besarnya energi listrik yang diserap oleh beban dalam waktu 1 hari ( $MW \times jam = MWh$ ). Contoh beban harian pada hari kerja biasanya terlihat pada Gambar 1.22a.

Pada kurva tersebut terlihat bahwa beban naik secara tajam pada sekitar pukul 18.00 dan mencapai puncaknya pada pukul 21.00. Ini disebabkan meningkatnya pemakaian untuk penerangan rumah, lampu-lampu hias dan penerangan jalan, iklan pada toko-toko, serta pemakaian TV di rumah-rumah.

Bila kurva beban harian memberi informasi tentang besarnya beban dari waktu ke waktu selama interval waktu satu hari, maka ***Kurva Kelangsungan Beban*** (*load duration curve*) memberikan informasi tentang lama (waktu) berlangsungnya daya dengan besar tertentu. Kurva kelangsungan beban ini (Gambar 1.22b) diturunkan dari kurva beban harian (Gambar 1.22a) yang dipotong-potong dengan selang waktu yang kecil, kemudian disusun dari kiri ke kanan secara berurutan, menurut tingkatan besarnya daya; luas bidang gambar kurva menyatakan besarnya energi listrik yang diperoleh dalam selang waktu tertentu.



Gambar 1. 22. Kurva beban harian energi listrik.

Sebagaimana beban berubah-ubah setiap jam dalam sehari, beban puncak harian pun tidak selalu tetap dalam setahun. Ada kalanya beban puncak tinggi pada bulan-bulan tertentu dan rendah pada bulan-bulan lainnya. Pada saat beban puncak rendah itulah saat yang tepat untuk melaksanakan pemeliharaan (*maintenance*) sistem peralatan. Menghentikan operasi peralatan untuk pemeliharaan akan mempengaruhi produksi listrik dan keandalan sistem. Karena akan berpengaruh secara ekonomis, menentukan saat yang tepat untuk melaksanakan pemeliharaan, merupakan tugas penting lainnya bagi seorang insinyur listrik.

### 1.7 Proteksi

Suatu gangguan atau kegagalan, dalam keadaan bagaimanapun, akan mempengaruhi aliran arus normal pada sistem tenaga listrik. Gangguan-gangguan yang terjadi dapat disebabkan oleh sambaran petir, hubungan singkat karena kejatuhan benda tertentu pada kawat penghantar, rusaknya isolasi, dan lain sebagainya.

Gangguan-gangguan tersebut dapat mengakibatkan lonjakan tegangan yang berlebihan, aliran arus yang sangat besar, bunga api listrik, dan kegagalan sistem tenaga untuk beroperasi secara keseluruhan. Menjadi tugas insinyur listrik pula untuk merancang sistem proteksi dengan mengatur pemakaian sekering (*fuse*), pemutus daya (*circuit breaker*), dan sistem relai yang mampu menentukan gangguan dengan cepat serta

memisahkannya segera dari bagian sistem yang lain. Dengan rancangan sistem proteksi yang baik, gangguan-gangguan yang terjadi dapat dilokalisir pada daerah kejadian saja sehingga tidak mengganggu para langganan di daerah lain.

### **1.8 Soal Latihan**

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan Sisten Tenaga Listrik?
2. Jelaskan mengapa energi listrik dapat memegang peranan penting dalam kehidupan manusia.
3. Jelaskan dan gambarkan sistem tenaga listrik mulai dari pembangkit sampai distribusi hingga konsumen listrik, seperti pabrik, industri maupun rumah tangga.
4. Jelaskan dan gambarkan cara konversi energi baik dari energi mekanis menjadi energi listrik maupun sebaliknya, dari energi listrik menjadi energi mekanis dan juga proses transfer energi listrik dari satu sistem ke sistem yang lainnya melalui medium medan magnet.
5. Jelaskan apa yang dimaksud dengan generator, motor, transformator dan medan magnet.

# BAB 2

## DASAR MEDAN MAGNETIK

### 2.1 Pendahuluan

Pokok bahasan pada bab ini yaitu mengenai dasar-dasar medan magnetik yang terdiri atas:

- Pengertian medan magnet
- Hubungan antara listrik dengan magnet
- *Magnetomotive force*/mmf (gaya gerak magnet, ggm), intensitas medan magnet, kerapatan fluks, *electromotive force*/emf (gaya gerak listrik (ggl)/tegangan induksi)
- Rangkaian magnetik, kurva  $H - B$ .

### 2.2 Medan Elektromagnetik

#### 2.2.1 Permeabilitas Mutlak dan Relatif dari suatu Media

Fenomena magnetisme dan elektromagnetisme bergantung pada sifat tertentu dari medium yang disebut permeabilitasnya. Setiap media seharusnya memiliki dua permeabilitas:

- a. permeabilitas mutlak ( $\mu$ ) dan
- b. permeabilitas relatif ( $\mu_r$ ).

Untuk mengukur permeabilitas relatif, vakum atau ruang kosong dipilih sebagai media referensi. Itu diberikan permeabilitas absolut  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  henry/meter. Jelas, permeabilitas relatif vakum dengan mengacu pada dirinya sendiri adalah kesatuan. Karenanya, untuk ruang kosong,

$$\begin{array}{ll} \text{permeabilitas mutlak} & \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \\ \text{permeabilitas relatif} & \mu_r = 1 \end{array}$$

Sekarang, ambil media apa pun selain vakum. Jika permeabilitas relatifnya, dibandingkan dengan vakum adalah  $\mu_r$ , maka permeabilitas absolutnya adalah  $\mu = \mu_0 \mu_r$  H/m.

### 2.2.2 Hukum Gaya Magnetik

Coulomb adalah orang pertama yang secara eksperimental menentukan ekspresi kuantitatif gaya magnet antara dua kutub titik yang terisolasi. Dapat dicatat di sini bahwa, mengingat fakta bahwa kutub magnet selalu berpasangan, dalam praktiknya tidak mungkin untuk mendapatkan kutub yang terisolasi. Konsep kutub terisolasi murni teoritis. Namun, kutub magnet yang tipis tapi panjang dapat diasumsikan sebagai kutub titik untuk semua keperluan praktis.

Dengan menggunakan neraca torsi, ia menemukan bahwa gaya antara dua kutub magnet yang ditempatkan pada sebuah medium adalah

- (i) berbanding lurus dengan kekuatan kutub magnet
- (ii) berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kutub dan
- (iii) berbanding terbalik dengan permeabilitas absolut media sekitarnya.

Misalnya, jika  $m_1$  dan  $m_2$  mewakili kekuatan magnet kedua kutub (satunya masih belum ditentukan), jarak antara keduanya dan  $\mu$  permeabilitas absolut media sekitarnya, maka gaya  $F$  diberikan oleh:

$$F \propto \frac{m_1 m_2}{\mu r^2} \quad \text{atau} \quad F = k \frac{m_1 m_2}{\mu r^2} \quad (1)$$

$$\vec{F} = k \frac{m_1 m_2}{\mu r^2} \hat{r} \quad (2)$$

dalam vektor dimana  $\hat{r}$  adalah vektor satuan untuk menunjukkan arah  $r$ .  
atau,

$$\vec{F} = k \frac{m_1 m_2}{\mu r^3} \vec{r} \quad (3)$$

dimana:

$$\vec{F} = \text{vektor}$$

$$\vec{r} = \text{vektor}$$

Dalam sistem satuan S.I., nilai konstanta  $k$  adalah  $= 1/4\pi$ .

Dalam media suatu bahan,

$$F = \frac{m_1 m_2}{4\pi \mu r^2} \text{ Newton} \quad \text{atau} \quad F = \frac{m_1 m_2}{4\pi \mu_0 \mu_r r^2} \text{ Newton} \quad (4)$$

Dalam bentuk vektor,

$$\vec{F} = \frac{m_1 m_2}{4\pi \mu r^3} \vec{r} = \frac{m_1 m_2}{4\pi \mu_0 r^2} N \quad (5)$$

Jika, dalam persamaan diatas,

$$m_1 = m_2 = m; \quad r = 1 \text{ meter}; \quad F = \frac{1}{4\pi\mu_0} N$$

maka,

$$m^2 = 1 \text{ atau } m = \pm 1 \text{ weber}$$

Oleh karena itu, kutub magnet satuan dapat didefinisikan sebagai kutub yang bila ditempatkan dalam ruang hampa pada jarak satu meter dari kutub yang sama dan kutub sama akan menolaknya dengan gaya  $1/4\pi\mu_0$  newton.

### 2.2.3 Kuat Medan Magnet (H)

Kuat medan magnet pada titik mana pun dalam medan magnet secara numerik sama dengan gaya yang dialami oleh kutub N dari satu weber yang ditempatkan pada titik itu. Oleh karena itu, satuan H adalah N/Wb. Misalkan, diperlukan untuk menemukan intensitas medan pada titik A jauh  $r$  meter dari kutub  $m$  weber. Bayangkan kutub yang sama dari satu weber ditempatkan di titik A. Gaya yang dialami oleh kutub ini adalah

$$F = \frac{m \times 1}{4\pi\mu_0 r^2} N$$

$$H = \frac{m}{4\pi\mu_0 r^3} \frac{N}{Wb} \text{ atau } \left(\frac{A}{m}\right) \text{ atau oersted} \quad (6)$$

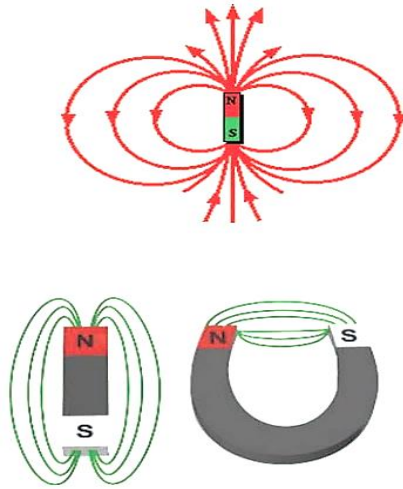
Juga, jika kutub  $m$  Wb ditempatkan dalam kuat medan seragam  $H$  N/Wb, maka gaya yang dialami oleh tiang adalah  $= mH$  newton.

Perlu dicatat bahwa kuat medan adalah besaran vektor yang memiliki besaran dan arah,

$$\vec{H} = \frac{m}{4\pi\mu_0 r^2} \hat{r} = \frac{m}{4\pi\mu_0 r^3} r \quad (7)$$

Akan sangat membantu untuk mengingat bahwa istilah berikut terkadang digunakan secara bergantian dengan intensitas medan:

Gaya magnetisasi, kuat medan, intensitas magnet dan intensitas medan magnet.



Magnetic lines of force

Gambar 2. 1. Garis-garis gaya magnet keluar dari kutub U menuju kutub S.

### 2.2.4 Potensial Magnetik

Potensial magnet pada titik mana pun dalam medan magnet diukur dengan usaha yang dilakukan dalam menggeser kutub-N satu weber dari tak terhingga ke suatu titik yang melawan gaya medan magnet. Besarnya diberikan oleh:

$$M = \frac{m}{4\pi\mu_0 r} \quad \text{J/Wb} \quad (8)$$

yang adalah kuantitas skalar.

### 2.2.5 Fluks per Kutub Unit

Sebuah unit kutub U seharusnya memancarkan fluks sebesar satu weber. Simbolnya adalah  $\Phi$ . Oleh karena itu, fluks yang keluar dari kutub U  $m$  weber diberikan oleh:

$$\Phi = m \text{ Wb} \quad (9)$$

### 2.2.6 Kerapatan Fluks ( $B$ )

Ini diberikan oleh fluks yang lewat per satuan luas melalui bidang pada sudut siku-siku terhadap fluks. Biasanya ditetapkan dengan huruf kapital  $B$  dan diukur dalam weber/meter<sup>2</sup>. Ini adalah kuantitas vektor.

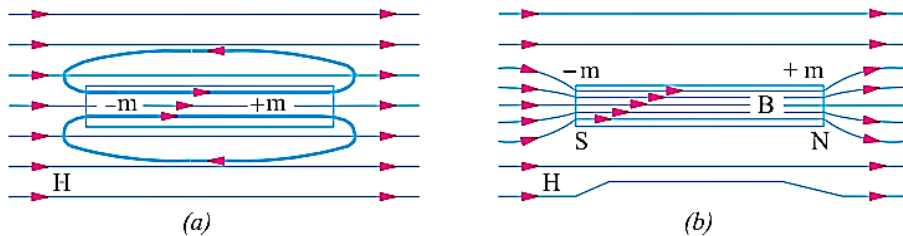
Ini  $\Phi$  Wb adalah fluks magnet total yang melewati secara normal melalui area seluas  $A \text{ m}^2$ , maka:

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \text{ atau Tesla (T)} \quad (10)$$

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{1}{4\pi r^2} \text{ Wb/m}^2$$

### 2.2.7 Permeabilitas Mutlak ( $\mu$ ) dan Permeabilitas Relatif ( $\mu_r$ )

Pada Gambar 2.2 ditunjukkan sebatang bahan magnet, katakanlah, besi ditempatkan dalam kuat medan yang seragam  $H$  N/Wb. Misalkan, kerapatan fluks  $B$  Wb/m<sup>2</sup> dikembangkan di dalam batang magnet.



Gambar 2. 2. Sebatang magnet ditempatkan dalam kuat medan seragam.

Kemudian, permeabilitas absolut bahan batang didefinisikan sebagai:

$$\mu = \frac{B \text{ henry}}{H \text{ meter}} \text{ atau } B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \text{ Wb/m}^2 \quad (11)$$

Ketika  $H$  terbentuk di udara (atau vakum), maka kerapatan fluks terkait yang dikembangkan di udara adalah:

$$B_0 = \mu_0 H \quad (12)$$

Sekarang, ketika batang besi ditempatkan di lapangan, itu dimagnetisasi oleh induksi. Jika kekuatan kutub yang diinduksi pada batang adalah  $m$  Wb, maka fluks  $m$  Wb berasal dari kutub U-nya, masuk kembali ke kutub S dan berlanjut dari kutub S ke kutub U di dalam magnet.

Jika  $A$  adalah bidang muka atau kutub dari batang besi magnetisasi, kerapatan fluks induksi pada batang adalah

$$B_i = \frac{m}{A} \text{ Wb/m}^2 \quad (13)$$

Oleh karena itu, kerapatan fluks total pada batang besi magnet terdiri dari dua bagian (Gambar 2.2(b)).

- (i)  $B_0$  – kerapatan fluks di udara bahkan ketika batang besi tidak ada.

(ii)  $B_i$  – kerapatan fluks induksi di batang besi magnet.

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_i = \mu_0 \mathbf{H} + m/A \quad (14)$$

Persamaan (i) di atas dapat ditulis sebagai  $\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} = \mu_r \mathbf{B}_0$

Untuk  $\mathbf{H}$  sama,

$$\mu_r = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{B}_0} = \frac{\mathbf{B} \text{ (material)}}{\mathbf{B}_0 \text{ (vacuum)}} \quad (15)$$

Oleh karena itu, permeabilitas relatif suatu bahan sama dengan **rasio kerapatan fluks yang dihasilkan dalam bahan tersebut dengan kerapatan fluks yang dihasilkan dalam ruang hampa oleh gaya magnet yang sama.**

### 2.2.8 Gaya pada Konduktor Pembawa Arus yang Berada dalam Medan Magnet

Diketahui bahwa setiap kali konduktor pembawa arus ditempatkan di medan magnet, konduktor tersebut mengalami gaya yang bertindak dalam arah tegak lurus baik terhadap arah arus maupun medan.

Pada Gambar 2.3 ditunjukkan konduktor  $XY$  terletak pada sudut siku-siku terhadap bidang horizontal seragam kerapatan fluks  $B \text{ Wb/m}^2$  yang dihasilkan oleh dua solenoida  $A$  dan  $B$ .

Jika  $l$  adalah panjang konduktor yang berada dalam bidang ini dan  $I$  ampere arus dibawa olehnya, maka besarnya gaya yang dialami olehnya:

$$\mathbf{F} = \mathbf{B}il = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}il \text{ newton} \quad (16)$$

Gunakan notasi vektor,

$$\vec{\mathbf{F}} = I\vec{l} \times \vec{\mathbf{B}}$$

dan,

$$F = Il B \sin \theta$$

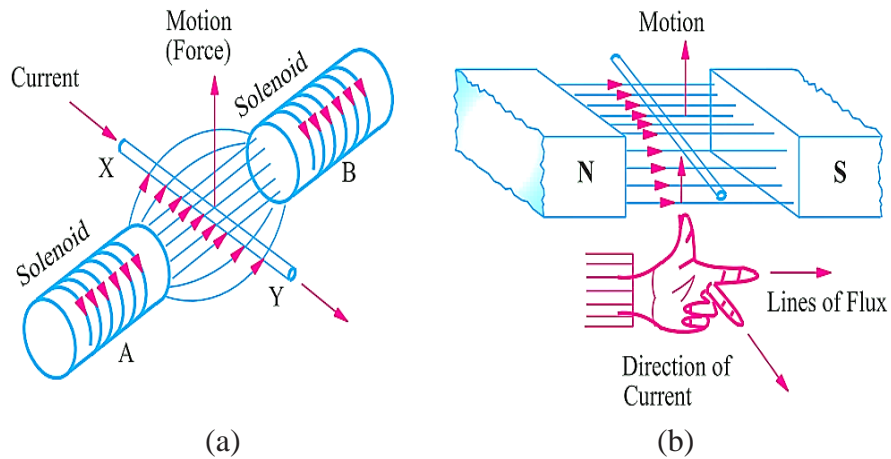
dimana,

$\theta$  = sudut diantara  $\vec{l}$  dan  $\vec{\mathbf{B}}$ , dengan sudut  $90^\circ$  dalam kasus ini.

atau,

$$F = IlB \sin 90^\circ = Il B \text{ newtons} \quad (\because \sin 90^\circ = 1) \quad (17)$$

Arah gaya ini dapat dengan mudah ditemukan oleh aturan tangan kiri Fleming.



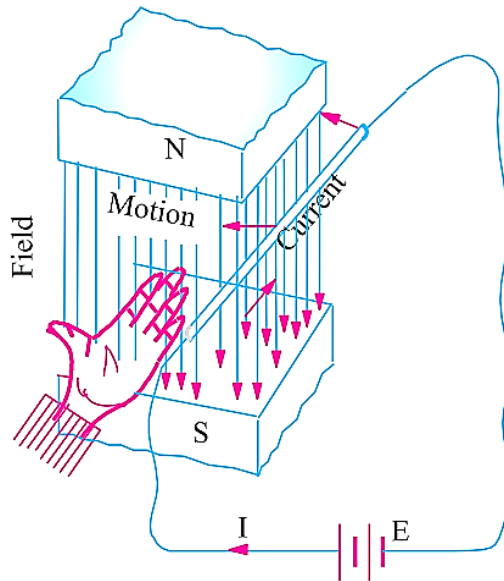
Gambar 2. 3. (a) Konduktor  $XY$  terletak ada sudut siku-siku terhadap bidang horizontal seragam kerapatan fluks  $\mathbf{B}$ , dan (b) Aturan Tangan Kiri.

Ulurkan tangan kiri Anda dengan jari telunjuk, jari kedua, dan ibu jari di sudut kanan satu sama lain. Jika jari telunjuk mewakili arah medan magnet dan jari tengah mewakili arah arus, maka jempol menunjukkan arah gerak. Ini diilustrasikan pada Gambar 2.3(b).

Gambar 2.4 menunjukkan metode lain untuk menemukan arah gaya yang bekerja pada konduktor pembawa arus. Ini dikenal sebagai aturan Tangan Kiri Datar. Gaya bekerja ke arah ibu jari jelas, arah motor konduktor sama dengan gaya, dan empat jari lainnya menunjukkan arah arus.

Perlu dicatat bahwa tidak ada gaya yang diberikan pada konduktor jika letaknya sejajar dengan medan magnet. Secara umum, jika konduktor terletak pada sudut  $\theta$  dengan arah medan, maka  $\mathbf{B}$  dapat dipecah menjadi dua komponen,  $\mathbf{B} \cos \theta$  sejajar dan  $\mathbf{B} \sin \theta$  tegak lurus dengan konduktor.

Yang pertama tidak menghasilkan efek sedangkan yang terakhir bertanggung jawab atas gerakan yang diamati. Dalam hal ini,  $\mathbf{F} = \mathbf{B}I \sin \theta$  newton, yang diekspresikan sebagai perkalian silang vektor di atas.



Gambar 2. 4. Aturan tangan kiri datar.

### 2.2.9 Hukum Kerja Ampere atau Hukum Rangkaian Ampere

Hukum kerja Ampere menyatakan bahwa m.m.f. (gaya *magnetomotive* sesuai dengan e.m.f. yaitu gaya gerak listrik medan listrik) di sekitar lintasan tertutup sama dengan arus yang dikurung oleh lintasan. Secara matematis,

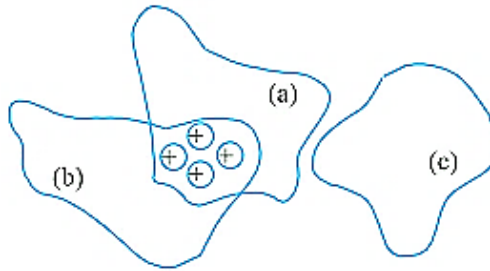
$$\int \vec{H} \cdot d\vec{S} = I \text{ ampere} \quad (18)$$

dimana  $\vec{H}$  adalah vektor yang merepresentasikan kekuatan medan magnet dalam perkalian titik dengan vektor  $d\vec{S}$  dari lintasan  $S$  melingkupi arus  $I$  ampere dan itulah sebabnya garis integral ( $\oint$ ) perkalian titik  $\vec{H} \cdot d\vec{S}$ .

Hukum kerja sangat komprehensif dan berlaku untuk semua medan magnet apapun bentuk lintasan tertutup, yaitu (a) dan (b) pada Gambar 2.5. Karena jalur c tidak menyertakan konduktor, maka m.m.f. disekitarnya nol.

Hukum kerja di atas digunakan untuk mendapatkan nilai **gaya gerak magnet** di sekitar rangkaian ideal sederhana seperti:

- (i) konduktor pembawa arus lurus panjang dan
- (ii) solenoid yang panjang.



Gambar 2. 5. Hukum Ampere berlaku pada lintasan tertutup.

### 2.2.10 Gaya Magnetomotive di sekitar Konduktor Lurus Panjang

Pada Gambar 2.6 ditunjukkan sebuah konduktor lurus yang diasumsikan meluas hingga tak terhingga di kedua arah. Misalkan konduktor ini membawa arus  $I$  ampere ke atas. Medan magnet terdiri dari garis-garis gaya melingkar yang bidangnya tegak lurus dengan konduktor dan pusatnya berada di tengah konduktor.

Misalkan kuat medan pada titik C jauh  $r$  meter dari pusat penghantar adalah  $H$ . Maka, artinya jika kutub U satuan ditempatkan di C maka akan mengalami gaya  $H$  newton. Arah gaya ini akan bersinggungan dengan garis gaya melingkar yang melewati C. Jika kutub U unit ini digerakkan satu kali putaran konduktor melawan gaya ini, maka pekerjaan yang dilakukan yaitu:

$$m.m.f. = gaya \times jarak = I$$

yaitu,

$$I = H \times 2\pi r \text{ joules} = \text{Ampere}$$

atau,

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

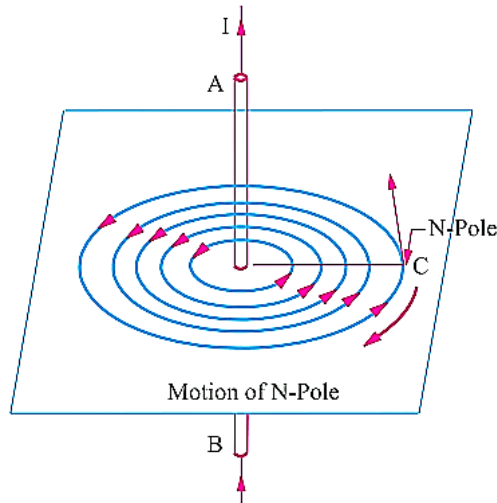
$$I = \int \vec{H} \cdot d\vec{S} \text{ Joules} = I \text{ Ampere} \quad (19)$$

Jelas, jika ada  $N$  konduktor (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6), maka,

$$H = \frac{NI}{2\pi r} \frac{A}{m} \text{ atau Oersted} \quad (20)$$

$$B = \mu_0 \frac{NI}{2\pi r} \frac{Wb}{m^2} \text{ tesla} \quad \dots \text{ dalam udara} \quad (21)$$

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r NI}{2\pi r} \frac{Wb}{m^2} \text{ tesla} \quad \dots \text{ dalam suatu bahan (22)}$$



Gambar 2. 6. Sebuah konduktor lurus diasumsikan tak terhingga dengan arah arus keatas.

### 2.3 Rangkaian Magnetik

Ini dapat didefinisikan sebagai rute atau jalur yang diikuti oleh fluks magnet. Hukum rangkaian magnet sangat mirip dengan (tetapi tidak sama dengan) hukum rangkaian listrik.

Pertimbangkan solenoida atau cincin besi toroidal yang memiliki jalur magnet  $l$  meter, luas penampang  $A$  m<sup>2</sup> dan kumparan  $N$  ternyata membawa  $I$  ampere-turn di mana saja seperti pada Gambar 2.7.

Maka, kuat medan magnet  $H$  di dalam solenoida adalah:

$$H = \frac{NI}{l} \frac{\text{Ampere} - \text{turn}}{m} \quad (23)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H = \frac{\mu_0 \mu_r NI}{l} \frac{Wb}{m^2} \quad (24)$$

Total fluks  $\Phi$  yang dihasilkan,

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu_0 \mu_r A}} \text{ Wb} \quad (25)$$

Pembilang ' $NI$ ' yang menghasilkan magnetisasi dalam rangkaian magnet dikenal sebagai **gaya gerak magnet** (m.m.f.). Jelas, satuannya adalah **ampere-turn** (AT). Ini analog dengan e.m.f. di sirkuit listrik.

Penyebutnya,

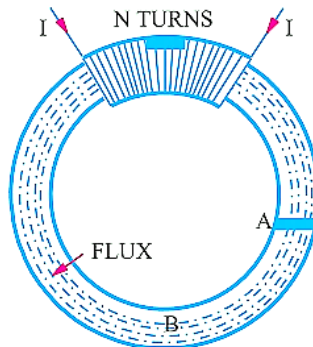
$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A}$$

disebut **reluktansi**  $\mathcal{R}$  rangkaian dan dianalogikan dengan resistansi dalam rangkaian listrik.

$$\text{fluks} = \frac{\text{m.m.f.}}{\text{reluktansi}} \quad \text{atau} \quad \phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} \quad (26)$$

Kadang-kadang, persamaan di atas disebut "**Hukum Rangkaian Magnetik Ohm**" karena persamaan di atas mirip dengan persamaan dalam rangkaian listrik, yaitu:

$$\text{arus} = \frac{\text{emf}}{\text{resistansi}} \quad \text{atau} \quad I = \frac{V}{R} \quad (27)$$



Gambar 2. 7. Cincin besi toroidal yang memiliki jalur magnet  $l$  meter, luas penampang  $A$  m<sup>2</sup>, jumlah lilitan kumparan  $N$  dengan  $I$  ampere-turn.

## Definisi Mengenai Rangkaian Magnetik

### 1. Gaya gerak magnet (ggm atau m.m.f.)

Ggm menggerakkan atau cenderung mendorong fluks melalui sirkuit magnet dan sesuai dengan gaya gerak listrik (e.m.f.) di sirkuit listrik.  $MMF$  sama dengan pekerjaan yang dilakukan dalam joule dalam membawa kutub magnet unit satu kali melalui seluruh rangkaian magnet. Ini diukur dalam ampere-turn.

Faktanya, karena beda potensial antara dua titik mana pun diukur dengan pekerjaan yang dilakukan dalam membawa muatan unit dari satu titik ke titik lainnya, demikian pula, m.m.f. antara dua titik diukur dengan usaha yang dilakukan dalam joule dalam membawa satu unit kutub magnet dari satu titik ke titik lainnya.

## 2. Ampere-turn (AT).

AT adalah satuan gaya magnetometre (m.m.f.) dan diberikan oleh produk dari jumlah lilitan rangkaian magnet dan arus dalam ampere pada lilitan tersebut.

## 3. Reluktansi.

**Reluktansi** adalah nama yang diberikan untuk properti suatu material yang menentang pembentukan fluks magnet di dalamnya. **Reluktansi**, pada kenyataannya, melawan aliran fluks magnet melalui material dan analogi dengan hambatan dalam rangkaian listrik.

Satuannya adalah AT / Wb.

$$\text{reluktansi, } \mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} \quad (28)$$

$$\text{resistansi, } \mathcal{R} = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\sigma A} \quad (29)$$

Dengan kata lain, **reluktansi** rangkaian magnet adalah jumlah amper-lilitan yang dibutuhkan per weber fluks magnet dalam rangkaian. Karena  $1 \text{ AT / Wb} = 1 / \text{henry}$ , satuan **reluktansi** adalah "1 per henry".

## 4. Permeativitas.

Permeativitas adalah kebalikan dari reluktansi dan menyatakan kemampuan mengembangkan fluks magnet. Permeativitas analogi dengan konduktansi dalam rangkaian listrik. Permeativitas diukur dalam satuan Wb/AT atau henry.

## 5. Reluktivitas.

Ini adalah reluktansi khusus dan sesuai dengan resistivitas yang merupakan 'resistensi spesifik'.

### 2.3.1 Rangkaian Magnetik Seri Komposit

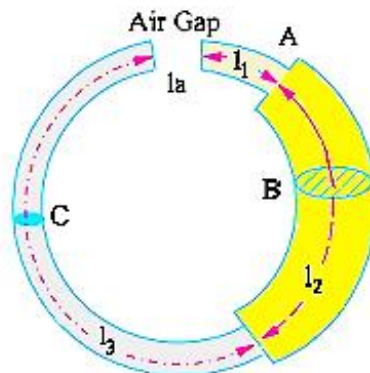
Pada Gambar 2.8 ditunjukkan rangkaian magnet seri komposit yang terdiri dari tiga bahan magnet yang berbeda dengan permeabilitas dan panjang yang berbeda,  $l$  serta satu celah udara ( $\mu_r = 1$ ). Setiap jalur akan memiliki reluktansi sendiri. Reluktansi total adalah jumlah dari reluktansi setiap bahan pada hubungan secara seri.

**Total reluktansi**

$$= \sum \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} \quad (30)$$

$$= \frac{l_1}{\mu_0 \mu_{r_1} A_1} + \frac{l_2}{\mu_0 \mu_{r_2} A_2} + \frac{l_3}{\mu_0 \mu_{r_3} A_3} + \frac{l_a}{\mu_0 A_a} \quad (31)$$

*fluks,* 
$$\Phi = \frac{mmf}{l} = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} \quad (32)$$



Gambar 2. 8. Rangkaian magnet seri komposit yang terdiri dari tiga bahan magnet berbeda.

### 2.3.2 Bagaimana menentukan ampere-turn?

Seperti telah ditunjukkan bahwa  $H = NI/l$  AT/m atau  $NI = Hl$ .

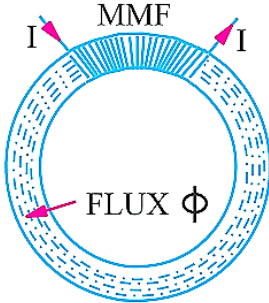
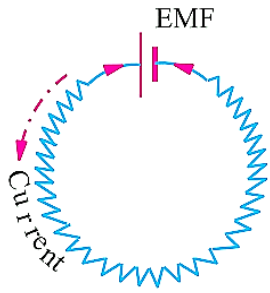
$$\text{ampere – turn AT} = Hl \quad (33)$$

Oleh karena itu, prosedur berikut harus diterapkan untuk menghitung total lilitan ampere dari jalur magnet komposit.

- (i) Tentukan  $H$  untuk setiap bagian dari rangkaian komposit.  
Untuk udara,  $H = B/\mu_0$ , selain itu,  $H = B/\mu_0\mu_r$ .
- (ii) Tentukan ampere-turn untuk setiap jalur secara terpisah dengan menggunakan relasi  $AT = Hl = NI$ .
- (iii) Jumlahkan ampere-turn ini untuk mendapatkan total ampere-turn untuk seluruh rangkaian.

### 2.3.3 Perbandingan Antara Rangkaian Magnetik dan Rangkaian Listrik

#### (i) Kesamaan Antara Rangkaian Magnetik dan Rangkaian Listrik

Rangkaian Magnetik	Rangkaian Listrik
 <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fluks, <math>\phi = \frac{\text{mmf}}{\text{reluktansi}} = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}</math></li> <li>2. mmf (ampere-turns)</li> <li>3. Fluks <math>\phi</math> (weber)</li> <li>4. Kerapatan fluks <math>B</math> (<math>\text{Wb}/\text{m}^2</math>)</li> <li>5. Reluktansi <math>\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A}</math></li> <li>6. Permeansi = <math>\frac{1}{\text{reluktansi}}</math></li> <li>7. Reluktivitas</li> <li>8. Permeabilitas = <math>\frac{1}{\text{reluktivitas}}</math></li> <li>9. Total mmf = <math>\Phi \mathcal{R}_1 + \Phi \mathcal{R}_2 + \Phi \mathcal{R}_3 + \dots</math></li> </ol>	 <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Arus, <math>I = \frac{\text{emf}}{\text{resistansi}} = \frac{V}{R}</math></li> <li>2. emf (volt)</li> <li>3. Arus <math>I</math> (ampere)</li> <li>4. Kerapatan arus (<math>\text{A}/\text{m}^2</math>)</li> <li>5. Resistansi, <math>R = \rho \frac{l}{A}</math></li> <li>6. Konduktansi = <math>\frac{1}{\text{resistansi}} = \frac{1}{R}</math></li> <li>7. Resistivitas</li> <li>8. Konduktivitas = <math>\frac{1}{\text{resistivitas}}</math></li> <li>9. Total emf = <math>IR_1 + IR_2 + IR_3 + \dots</math></li> </ol>

## (ii) Perbedaan Antara Rangkaian Magnetik dan Rangkaian Listrik

1. Sebenarnya, fluks tidak benar-benar 'mengalir' dalam arti dari arus listrik mengalir.
2. Jika suhu dijaga konstan, maka resistansi rangkaian listrik tetap dan tidak tergantung pada kekuatan arus (atau rapat arus). Di sisi lain, reluktansi rangkaian magnet bergantung pada fluks (dan dengan demikian kerapatan fluks) yang terbentuk di dalamnya.

Hal ini terjadi karena  $\mu$  (yang sama dengan kemiringan kurva  $H/B$ ) tidak konstan bahkan untuk material tertentu karena bergantung pada **kerapatan fluks  $B$** . Nilai  $\mu$  besar untuk nilai  $B$  rendah dan sebaliknya. Oleh karena itu, reluktansi kecil ( $\mathcal{R} = l/\mu A$ ) untuk nilai  $B$  kecil dan besar untuk nilai  $B$ .

3. Aliran arus dalam rangkaian listrik melibatkan pengeluaran energi secara terus menerus tetapi dalam rangkaian magnet, energi yang dibutuhkan hanya untuk menciptakan fluks pada awalnya tetapi tidak untuk mempertahankannya.

### 2.3.4 Rangkaian Magnetik Paralel

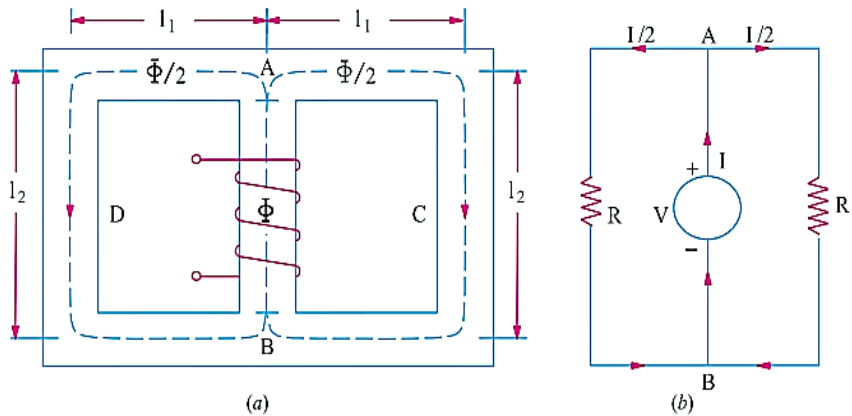
Gambar 2.9(a) menunjukkan rangkaian magnet paralel yang terdiri dari dua jalur magnet paralel  $ACB$  dan  $ADB$  yang ditindaklanjuti oleh m.m.f yang sama.

Setiap jalur magnet memiliki panjang rata-rata =  $2(l_1 + l_2)$ .

Fluks  $\phi$  yang dihasilkan oleh gulungan pada pusat inti dibagi merata pada titik  $A$  diantara dua jalur paralel luar.

Besar reluktansi yang terdapat pada kedua jalur paralel adalah = setengah dari reluktansi pada setiap jalur.

Gambar 2.9(b) menunjukkan rangkaian listrik ekuivalen dimana resistansi terhadap sumber tegangan adalah =  $R \parallel R = R/2$ .



Gambar 2. 9. Rangkaian magnetik paralel dua jalur paralel  $ACB$  dan  $ADB$ .

Perlu dicatat bahwa reluktansi pada pertengahan inti  $AB$  diabaikan dalam perhitungan di atas.

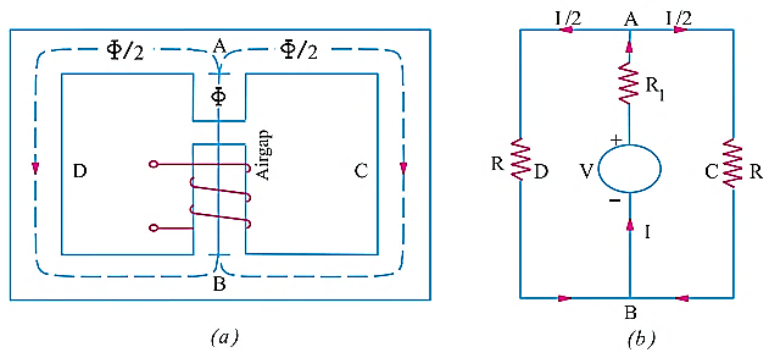
### 2.3.5 Rangkaian Magnetik Seri-Paralel

Sirkuit seperti itu ditunjukkan pada Gambar 2.10(a). Ini menunjukkan dua rangkaian magnet paralel  $ACB$  dan  $ADB$  yang terhubung melintasi jalur magnet umum  $AB$  yang berisi celah udara dengan panjang  $l$ . Seperti biasa, fluks  $\Phi_{in}$  pada inti bersama dibagi rata pada titik  $A$  antara dua jalur sejajar yang memiliki reluktansi yang sama.

Reluktansi jalur  $AB$  terdiri dari

- (i) **reluktansi celah udara** dan
- (ii) **reluktansi pusat inti** yang relatif dapat **diabaikan**. Oleh karena itu, **reluktansi pusat inti  $AB$**  hanya **sama dengan reluktansi celah udara** yang menghubungkan kedua reluktansi paralel yang besarnya sama. Oleh karena itu, m.m.f. yang diperlukan untuk rangkaian ini adalah jumlah dari
  - (i) mmf yang diperlukan untuk celah udara dan
  - (ii) mmf yang diperlukan untuk salah satu dari dua jalur (tidak keduanya) yaitu mmf jalur  $ADB$  atau mmf jalur  $ACD$ .

Rangkaian listrik ekuivalen ditunjukkan pada Gambar 2.10(b) dimana resistansi total terhadap sumber tegangan adalah  $= R_1 + R \parallel R = R_1 + R/2$ .



Gambar 2. 10. Rangkaian magnetik seri-paralel **ACB** dan **ADB** terhubung melalui jalur magnet umum **AB** yang berisi celah udara.

### 2.3.6 Fluks Bocor dan Koefisien Bocor Hopkinson

Fluks bocor adalah fluks yang mengikuti jalur yang tidak dimaksudkan untuknya. Pada Gambar 2.11 diperlihatkan kumparan cincin besi dengan kumparan dan memiliki celah udara. **Fluks pada celah udara dikenal sebagai fluks yang berguna** karena hanya fluks inilah yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan yang bermanfaat. Ditemukan bahwa tidak mungkin membatasi semua fluks hanya pada jalur besi, meskipun biasanya mungkin untuk membatasi sebagian besar arus listrik ke jalur tertentu, misalnya kabel, dengan mengelilinginya dengan isolasi.

Sayangnya, tidak ada isolator untuk fluks magnet. Udara, yang merupakan penyekat listrik yang bagus, sayangnya merupakan konduktor magnet yang cukup baik. Karenanya, seperti yang ditunjukkan, beberapa fluks bocor melalui udara yang mengelilingi cincin besi. Adanya fluks kebocoran dapat dideteksi dengan kompas. Bahkan pada dinamo yang dirancang dengan baik, ditemukan bahwa 15% sampai 20% dari total fluks yang dihasilkan bocor tanpa digunakan secara berguna.

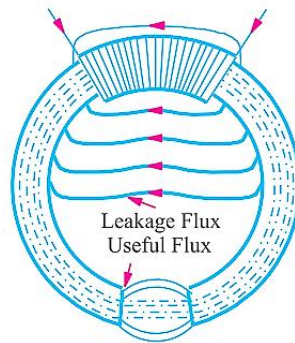
Jika,  $\Phi_t$  = total fluks yang dihasilkan ;  $\Phi$  = fluks yang berguna tersedia di celah udara, maka:

$$\text{koefisien bocor } \lambda = \frac{\text{total fluks}}{\text{fluks berguna}} \quad \text{atau } \lambda = \frac{\Phi_t}{\Phi} \quad (34)$$

Pada mesin listrik seperti motor dan generator, kebocoran magnet tidak diinginkan, karena meskipun tidak menurunkan efisiensi daya, namun hal itu menyebabkan peningkatan berat dan biaya pembuatannya.

Kebocoran magnet dapat diminimalkan dengan menempatkan kumparan atau belitan yang menarik sedekat mungkin dengan celah udara atau ke titik-titik di sirkuit magnet di mana fluks akan digunakan untuk tujuan yang berguna.

Juga terlihat dari Gambar 2.11 bahwa **ada garis-garis fluks fringing** atau sebaran di tepi celah udara. Pinggiran ini meningkatkan area efektif celah udara. Nilai  $\lambda$  untuk mesin listrik modern bervariasi antara 1,1 dan 1,25.



Gambar 2. 11. Cincin besi dengan kumparan, celah udara dan fluks bocor.

### 2.3.7 Kurva Magnetisasi

Perkiraan kurva magnetisasi dari beberapa bahan magnet ditunjukkan pada Gambar 2.12.

Kurva ini dapat ditentukan dengan metode berikut ini asalkan bahannya berupa cincin:

- (a) dengan alat galvanometer balistik dan
- (b) dengan alat ukur fluksmeter.

#### (a) Kurva Magnetisasi dengan Galvanometer Balistik

Pada Gambar 2.13 ditunjukkan spesimen cincin dengan luas penampang seragam, kumparan seragam dimana kumparan  $P$  dihubungkan ke baterai  $B$  melalui saklar pembalik  $RS$ , resistansi variabel  $R_1$  dan amperemeter. Kumparan sekunder lainnya  $S$  juga melilit sebagian kecil cincin dan dihubungkan melalui resistansi  $R$  ke galvanometer balistik  $BG$ .

Arus melalui  $P$  primer dapat diatur dengan bantuan  $R_1$ . Misalkan arus primer adalah  $I$ . Ketika arus primer dibalik dengan menggunakan  $RS$ , maka

fluks dibalik melalui  $S$ , maka e.m.f. diproduksi di dalamnya yang mengirimkan arus melalui  $BG$ .

Arus ini berdurasi sangat singkat. Defleksi pertama atau 'simpangan'  $BG$  sebanding dengan jumlah listrik atau muatan yang melewatinya selama waktu yang dibutuhkan muatan ini untuk mengalir lebih singkat dibandingkan dengan waktu satu osilasi.

Jika,

$\theta$  = defleksi pertama atau 'simpangan' galvanometer ketika arus primer  $I$  berbalik arah

$k$  = konstanta balistik dari galvanometer yaitu muatan per unit defleksi

maka,

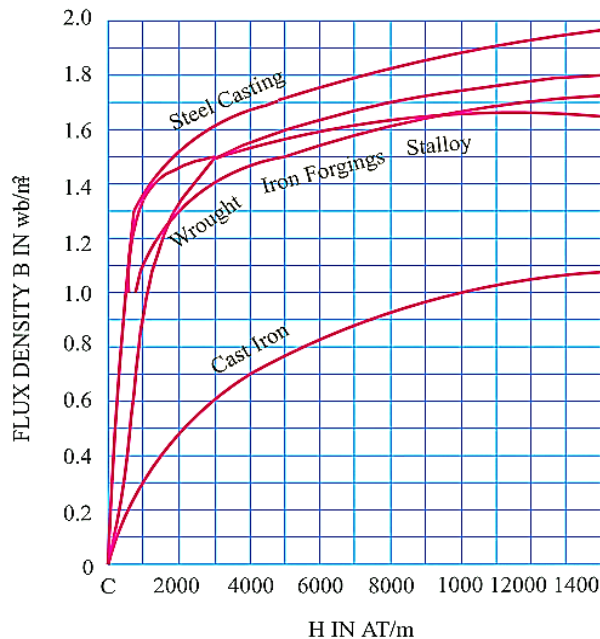
$$\text{muatan yang melintasi } BG \text{ adalah} = k\theta \text{ coulomb} \quad (35)$$

Asumsikan

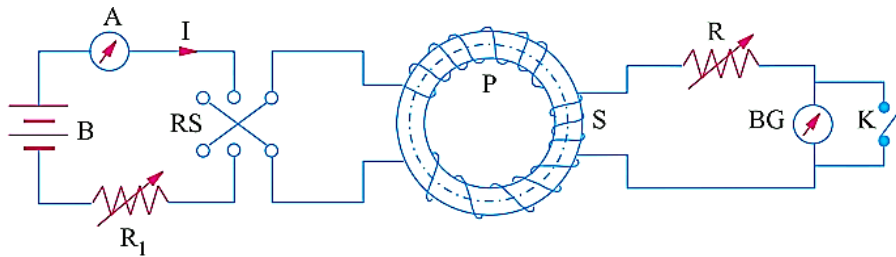
$\Phi$  = fluks dalam Wb yang dihasilkan oleh arus primer  $I$  ampere;

$t$  = waktu fluks berbalik arah ;

maka laju perubahan fluks =  $\frac{2\Phi}{t}$  Wb/detik.



Gambar 2. 12. Kurva magnetisasi  $H - B$  dari beberapa bahan magnet.



Gambar 2. 13. Spesimen cincin dengan kumparan dan luas penampang seragam.

Jika  $N_2$  adalah jumlah lilitan pada kumparan sekunder  $S$ , kemudian rata-rata e.m.f. menginduksi di dalamnya,

$$= N_2 \cdot \frac{2\Phi}{t} \text{ volt} \quad (36)$$

$$\text{Arus sekunder atau arus melalui } BG = \frac{2N_2\Phi}{R_s t} \text{ ampere} \quad (37)$$

dengan  $R_s$  adalah resistansi total dari rangkaian sekunder.

Muatan mengalir melalui **BG**

$$\begin{aligned} &= \text{ arus rata-rata} \times \text{ waktu} \\ &= \frac{2N_2\Phi}{R_s t} \times t = \frac{2N_2\Phi}{R_s} \text{ coulomb} \end{aligned} \quad (38)$$

Persamaan (35) = persamaan (38), diperoleh,

$$k\theta = \frac{2N_2\Phi}{R_s} \quad \therefore \Phi = \frac{k\theta R_s}{2N_2} \text{ Wb} \quad (39)$$

Jika  $A \text{ m}^2$  adalah luas penampang cincin, maka kerapatan fluks adalah

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{k\theta R_s}{2N_2 A} \text{ Wb/m}^2 \quad (40)$$

Jika  $N_1$  adalah jumlah lilitan primer dan  $l$  meter rata-rata keliling cincin, maka gaya magnetisasi  $H = N_1 I/l$  AT/m.

Percobaan di atas diulangi dengan nilai arus primer yang berbeda dan membentuk data yang diperoleh, yaitu kurva **B/H** atau kurva magnetisasi.

### (b) Kurva Magnetisasi oleh Fluksmeter

Dalam metode ini, **BG** pada Gambar 2.13 diganti dengan fluksmeter yang merupakan jenis galvanometer khusus balistik. Ketika arus melalui P dibalik, fluks juga dibalik. Defleksi fluksmeter sebanding dengan

perubahan hubungan fluks pada kumparan sekunder. Jika fluks dibalik dari  $+\Phi$  ke  $-\Phi$ , perubahan hubungan fluks pada S sekunder  $= 2\Phi N_2$ .

Jika  $\theta$  = Penyimpangan sudut pada fluksmeter  
 $C$  = Konstanta fluksmeter yaitu weber-turn per unit simpangan

maka perubahan fluks terkait dalam  $S = C\theta$

$$\therefore 2\Phi N_2 = C\theta \quad \text{atau} \quad \Phi = \frac{C\theta}{N_2} \text{ Wb};$$

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{C\theta}{2N_2A} \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \quad (41)$$

### Contoh Soal 1.

Sebuah fluksmeter dihubungkan ke suatu kumparan uji yang memiliki 600 lilitan dan luas rata-rata  $4 \text{ cm}^2$ . Koil pencari ditempatkan di tengah solenoida berinti udara sepanjang 1 meter dan digulung dengan 1000 lilitan. Ketika arus 4 A dibalik, terjadi defleksi 20 skala divisi pada fluksmeter. Hitung kalibrasi dalam putaran Wb per divisi skala.

### Penyelesaian:

Gaya magnetisasi solenoida adalah  $H = NI/l$  AT/m

$$B = \mu_0 H = \mu_0 NI/l = 4\pi \times 10^{-7} \times 1000 \times 4/1 = 16\pi \times 10^{-4} \text{ Wb/m}^2$$

Fluks yang dihubungkan dengan kumparan tersebut

$$\phi = BA = 64\pi \times 10^{-8} \text{ Wb}$$

Perubahan total hubungan fluks pada pembalikan

$$= 2 \times 64\pi \times 10^{-8} \times 600 \text{ Wb-turn}$$

$$= 7.68\pi \times 10^{-4} \text{ Wb-turn}$$

Konstanta fluksmeter  $C$  diberikan oleh:

$$= \frac{\text{perubahan fluks lingkup}}{\text{defleksi yang terjadi}}$$

$$= 7.68\pi \times 10^{-4}/20 = 1.206 \times 10^{-4} \text{ Wb-turns/division}$$

### Contoh Soal 2.

Sebuah galvanometer balistik, terhubung ke suatu kumparan uji untuk mengukur kerapatan fluks dalam inti, memberikan 100 divisi skala pada pembalikan fluks. Kumparan galvanometer memiliki resistansi 180 ohm. Konstanta galvanometer adalah 100  $\mu\text{C}$  per divisi skala. Kumparan uji memiliki luas 50  $\text{cm}^2$ , kumparan dengan 1000 lilitan memiliki resistansi 20 ohm. Hitung kerapatan fluks di inti.

### Penyelesaian:

$$k\theta = \frac{2N_2\Phi}{R_s} \quad \text{atau} \quad \Phi = \frac{k\theta R_s}{2N_2} \quad \text{Wb}$$

$$\therefore BA = \frac{k\theta R_s}{2N_2} \quad \text{atau} \quad B = \frac{k\theta R_s}{2N_2 A}$$

Maka,

$$k = 100 \frac{\mu\text{C}}{\text{division}} = 100 \times 10^{-6} = 10^{-4} \text{ C/divisi}$$

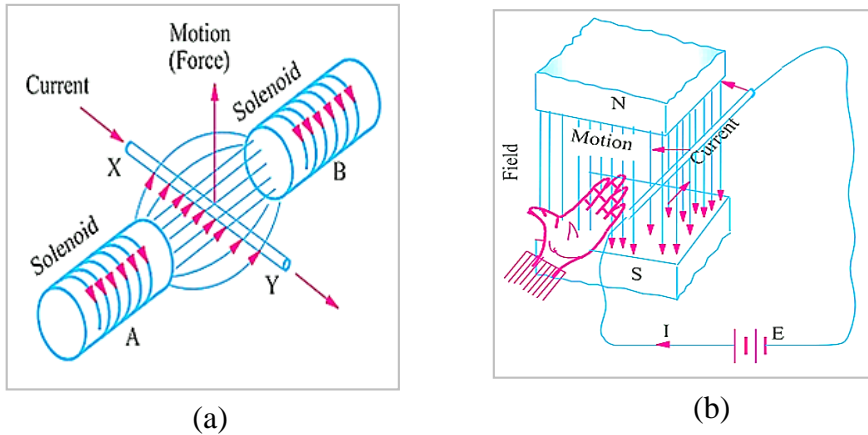
$$\theta = 100; \quad A = 50 \text{ cm}^2 = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$R_s = 180 + 20 = 200 \Omega$$

$$\therefore B = 10^{-4} \times 100 \times \frac{200}{2} \times 1000 \times 5 \times 10^{-3} = 0,2 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

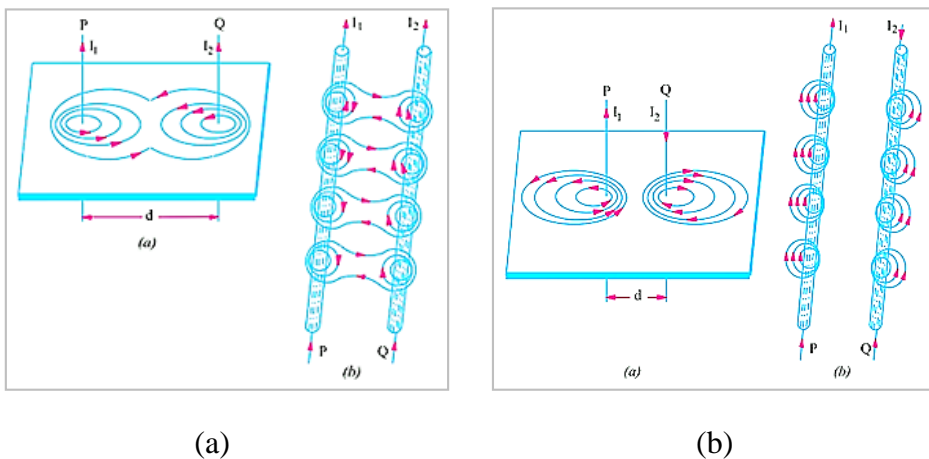
### 2.4 Soal Latihan

1. Gaya antara dua konduktor paralel panjang adalah 15 kg/meter. Jarak konduktor adalah 10 cm. Jika satu konduktor membawa arus dua kali lipat dari yang lain, hitung arus di setiap konduktor.  
[Jawaban: 6,060 A; 12,120 A]
2. Jelaskan berikut ini.
  - a. Gambar 2.14(a), jelaskan apakah yang dimaksud dalam gambar berikut.
  - b. Gambar 2.14(b), jelaskan hukum medan magnetik apakah yang berlaku dalam gambar tersebut?



Gambar 2. 14. Gambar soal latihan No.2.

3. Jelaskan berikut ini.
- Jelaskan gaya yang terjadi pada dua konduktor yang dialiri arus listrik seperti pada Gambar 2.15(a) dan tentukan besarnya gaya tersebut.
  - Jelaskan gaya yang terjadi pada dua konduktor yang dialiri arus listrik seperti pada Gambar 2.15(b) dan tentukan besarnya gaya tersebut.



Gambar 2. 15. Gambar soal latihan No.3.

4. Sebuah cincin-besi dengan panjang rata-rata 30 cm terbuat dari tiga potongan besi-tuang, yang masing-masing memiliki **panjang yang sama** tetapi diameternya berbeda yaitu: 4, 3 dan 2,5 cm. Celah udara dengan panjang 0,5 mm terletak pada ujung potongan besi-tuang berdiameter 2,5 cm.

Jika sebuah kumparan dengan  $N = 1000$  lilitan pada cincin, tentukan nilai arus  $I$  yang diperlukan untuk menghasilkan kerapatan fluks  $\mathbf{B} = 0,5 \text{ Wb/m}^2$  pada celah udara.

Permeabilitas udara bebas,  $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ .

Abaikan rugi-rugi dan pengaruh *fringing*.

Karakteristik kurva magnetiksasi  $H / B$  pada besi-tuang diberikan pada tabel berikut ini:

$B \text{ (Wb/m}^2\text{)} :$	0,1	0,2	0,3	0,35	0,4	0,5
$H \text{ (AT/m)} :$	280	620	990	1195	1400	2000

5. Untuk rangkaian magnet yang ditunjukkan pada Gambar 2.16, dimana fluks pada lengan kanan sebesar  $\Phi_2 = 1,5 \text{ mWb}$  dan jumlah lilitan belitan pada lengan tengah  $\mathbf{N} = 1400$  lilitan.

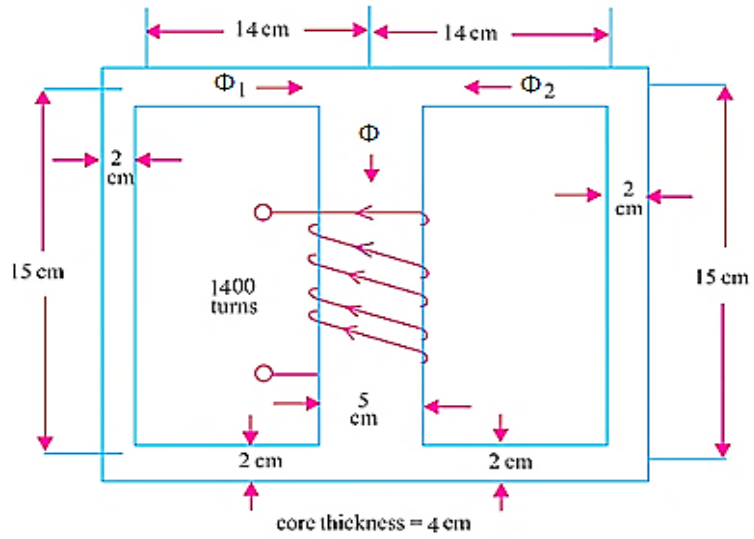
Abaikan rugi-rugi dan pengaruh *fringing*.

Hitunglah :

- Berapa fluks  $\Phi$  pada lengan tengah.
- Berapa arus  $I$  yang diperlukan.

Kurva magnetisasi  $H - B$  untuk inti diberikan pada tabel berikut ini:

$B \text{ (Wb/m}^2\text{)}:$	0,6	0,8	1,0	1,3	1,5	1,8	1,875	2
$H \text{ (AT/m)}:$	600	800	950	1100	1200	1450	1506	1600



Gambar 2. 16. Rangkaian magnet soal latihan No.5.

**[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]**

# BAB 3

## HISTERESIS DAN ARUS EDDY

### 3.1 Pendahuluan

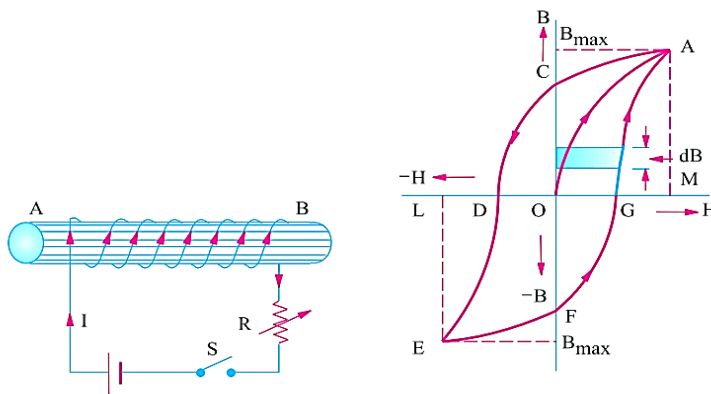
Pada pembahasan berikut ini mengenai histeresis dan arus eddy yang timbul pada magnet dan juga pengaruhnya pada rugi-rugi yang ditimbulkan.

### 3.2 Histeresis Magnetik

Ini dapat didefinisikan sebagai tertinggal magnetisasi atau kerapatan fluks induksi ( $B$ ) di belakang gaya magnetisasi ( $H$ ). Atau, dapat didefinisikan sebagai kualitas zat magnet, yang karenanya energi dibuang di dalamnya, pada pembalikan magnetnya.

Mari kita ambil sebatang besi  $AB$  yang tidak termagnetisasi dan magnetisasinya dengan menempatkannya di dalam bidang solenoida (lihat Gambar 3.1). Medan  $H$  ( $= NI / l$ ) yang dihasilkan oleh solenoida disebut gaya magnetisasi. Nilai  $H$  dapat dinaikkan atau diturunkan dengan menaikkan atau menurunkan arus yang melalui kumparan.

Misalkan  $H$  dinaikkan secara bertahap dari nol hingga nilai maksimum tertentu dan nilai kerapatan fluks ( $B$ ) yang sesuai dicatat. Jika kita memplot hubungan antara  $H$  dan  $B$ , kurva seperti  $OA$ , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Bahan menjadi jenuh secara magnetis untuk  $H = OM$  dan pada saat itu kerapatan fluks maksimum  $B_{max}$  ditetapkan melaluinya.



Gambar 3. 1. Batang  $AB$  dalam solenoida. Gambar 3. 2. Kurva  $H$  dan  $B$ .

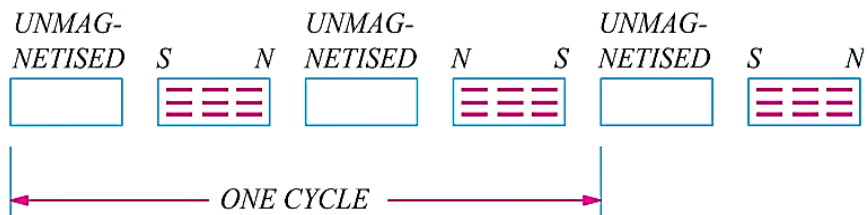
Jika  $H$  sekarang diturunkan secara bertahap (dengan menurunkan arus solenoida), kerapatan fluks  $B$  tidak akan berkurang sepanjang  $AO$ , seperti yang diharapkan, tetapi akan berkurang lebih cepat sepanjang  $AC$ . Ketika  $H$  nol,  $B$  tidak tetapi memiliki nilai pasti  $B_r = OC$ . Ini berarti bahwa saat menghilangkan gaya magnetisasi  $H$ , batang besi tidak mengalami kerusakan magnet sepenuhnya. Nilai  $B$  ( $= OC$ ) ini mengukur retentivitas atau remanensi material dan disebut kerapatan fluks sisa atau sisa  $B_r$ .

Untuk mendemagnetisasi batang besi, kita harus menerapkan gaya magnet ke arah sebaliknya. Ketika  $H$  dibalik (dengan membalikkan arus melalui solenoida), maka  $B$  direduksi menjadi nol pada titik D dimana  $H = OD$ . Nilai  $H$  yang diperlukan untuk menghapus magnet sisa ini dikenal sebagai gaya koersif ( $H_c$ ) dan merupakan ukuran **koersivitas** material yaitu 'keuletan' yang digunakannya untuk mempertahankan magnetismenya.

Jika, setelah magnetisasi direduksi menjadi nol, nilai  $H$  dinaikkan lebih lanjut ke arah 'negatif' yaitu dibalik, batang besi kembali mencapai keadaan saturasi magnet, diwakili oleh titik  $L$ . Dengan mengambil  $H$  kembali dari nilainya yang sesuai untuk saturasi negatif, ( $= OL$ ) ke nilai untuk saturasi positif ( $= OM$ ), kurva  $EFGA$  serupa diperoleh. Jika kita mulai lagi dari  $G$ , kurva yang sama  $GACDEFG$  diperoleh sekali lagi.

Terlihat bahwa  $B$  selalu tertinggal di belakang  $H$ . Keduanya tidak pernah mencapai nilai nol secara bersamaan.  $B$  di belakang  $H$  ini diberi nama 'hysteresis' yang secara harfiah berarti 'tertinggal'. Loop tertutup  $ACDEFGA$  yang diperoleh saat batang besi diambil melalui satu siklus magnetisasi lengkap yang dikenal sebagai 'loop hipotesis'.

Dengan satu siklus magnetisasi suatu bahan magnet berarti bahan itu dibawa melalui satu pembalikan magnetisasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3. Satu siklus magnetisasi suatu bahan magnet.

### 3.2.1 Area Loop Histeresis

Sama seperti area diagram indikator yang mengukur energi yang tersedia di mesin, ketika diambil melalui satu siklus operasi, demikian juga area loop histeresis mewakili energi bersih yang digunakan untuk mengambil batang besi melalui satu siklus magnetisasi.

Menurut Teori Molekuler magnetisme Weber, ketika bahan magnet dimagnetisasi, molekulnya dipaksa sepanjang garis lurus. Jadi, energi dihabiskan dalam proses ini. Sekarang, jika besi tidak memiliki retentivitas, maka energi yang dihabiskan untuk meluruskan molekul dapat dipulihkan dengan mereduksi  $H$  menjadi nol dengan cara yang sama seperti energi yang disimpan dalam pegas dapat dipulihkan dengan membiarkan pegas melepaskan energinya dengan menggerakkan beberapa jenis. beban. Oleh karena itu, dalam kasus magnetisasi suatu bahan dengan **retentivitas tinggi**, semua energi yang semula digunakan untuk meluruskan molekul tidak diperoleh kembali ketika  $H$  direduksi menjadi nol. Sekarang kita akan melanjutkan untuk menemukan kehilangan energi ini per siklus magnetisasi.

Misalkan  $l$  = rata-rata panjang batang besi;  $A$  = luas penampang;  $N$  = Jumlah lilitan kabel solenoida.

Jika  $B$  adalah kerapatan fluks setiap saat, maka  $\Phi = BA$ .

Ketika arus melalui solenoida berubah, maka fluks juga berubah sehingga menghasilkan e.m.f. yang nilainya,

$$e = N \frac{d\Phi}{dt} \text{ volt} = N \frac{d}{dt} (BA) = NA \frac{dB}{dt} \text{ volt} \quad (1)$$

(abaikan tanda  $-$ )

$$H = \frac{NI}{l} \quad \text{atau} \quad I = \frac{Hl}{N} \quad (2)$$

Kekuatan atau tingkat pengeluaran energi dalam mempertahankan ' $I$ ' saat ini terhadap induksi e.m.f. ' $e$ ' adalah

$$= eI \text{ watt} = \frac{Hl}{N} \times NA \frac{dB}{dt} = AlH \frac{dB}{dt} \text{ watt} \quad (3)$$

Energi yang diperlukan:

$$'eI dt' = Al.H \frac{dB}{dt} \times dt = Al.H. dB \text{ joule}$$

Total kerja bersih yang dilakukan untuk satu siklus magnetisasi adalah

$$W = Al \oint H dB \text{ joule} \quad (4)$$

Dengan  $\oint$  singkatan dari integrasi selama seluruh siklus. Sekarang, 'H dB' mewakili area yang diarsir pada Gambar 3.4. Maka,  $\oint H dB =$  luas loop yaitu luas antara kurva  $B/H$  dan sumbu  $B$ .

Sehingga,

$$\text{Kerja yang dilakukan/siklus} = Al \times (\text{luas loop}) \text{ joule}$$

dimana  $Al =$  volume material.

Kerja netto yang dilakukan /siklus/ $m^3 =$  (luas loop) joule,

Atau,

$$W_h = (\text{luas loop } B/H) \text{ joule}/m^3/\text{siklus}.$$

### **Perhatikan.**

*Skala B dan H harus dipertimbangkan saat menghitung luas lingkaran yang sebenarnya.*

Misalnya,

Jika dipakai skala,  $1 \text{ cm} = x \text{ AT/m}$  –untuk  $H$  dan  $1 \text{ cm} = y \text{ Wb/m}^2$  –untuk  $B$

maka,  $W_h = xy$  (luas loop  $B/H$ ) joule/ $m^3$ /siklus.

Pada pernyataan di atas, luas loop harus dalam  $\text{cm}^2$ .

Seperti yang terlihat dari atas, loop histeresis mengukur energi yang hilang karena histeresis yang muncul dalam bentuk panas dan dengan demikian menaikkan suhu bagian rangkaian magnetik yang mengalami pembalikan magnet.

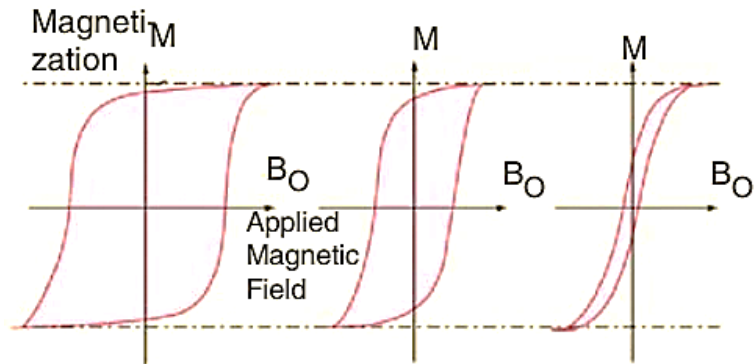
Bentuk loop histeresis bergantung pada sifat material magnetis (Gambar 3.4).

**Loop 1 untuk baja keras.** Karena **retentivitas** dan kolektivitasnya yang tinggi, sangat cocok untuk membuat magnet permanen. Tetapi karena kehilangan histeresis yang besar (seperti yang ditunjukkan oleh area loop yang besar), ini tidak cocok untuk pembalikan magnetisasi yang cepat. Paduan aluminium, nikel dan baja tertentu yang disebut paduan Alnico telah ditemukan sangat cocok untuk membuat magnet permanen.

**Loop 2 untuk besi tempa dan baja tuang.** Hal tersebut menunjukkan bahwa material ini memiliki permeabilitas yang tinggi dan

koersivitas yang cukup baik, sehingga cocok untuk digunakan sebagai inti elektromagnet.

**Loop 3 adalah untuk baja lembaran paduan** dan menunjukkan permeabilitas tinggi dan kehilangan histeresis rendah. Oleh karena itu, bahan tersebut paling cocok untuk membuat inti angker dan transformator yang mengalami pembalikan cepat magnetisasi.

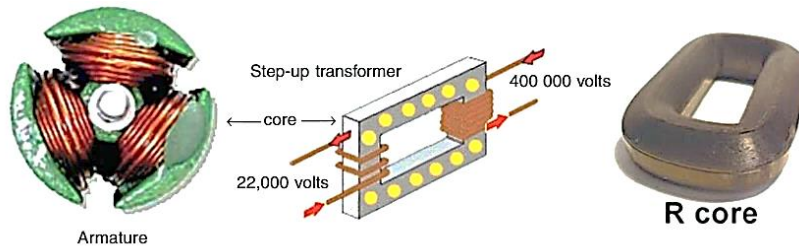


Gambar 3. 4. Bentuk loop histeresis bergantung pada sifat magnetik material.

### 3.3 Sifat-Sifat dan Aplikasi Bahan Ferromagnetik

Bahan ferromagnetik yang memiliki retentivitas rendah banyak digunakan dalam peralatan listrik dan komunikasi. Karena besi silikon memiliki permeabilitas dan kerapatan fluks saturasi tinggi, ia banyak digunakan dalam sirkuit magnetik mesin listrik dan peralatan arus berat di mana kerapatan fluks yang tinggi diinginkan untuk membatasi luas penampang dan, oleh karena itu, mengurangi berat dan biaya.

Laminasi silikon-iron tipis (dijepit satu sama lain tetapi diisolasi satu sama lain dengan pernis, kertas atau skala permukaan) digunakan dalam konstruksi inti transformator dan jangkar di mana penting untuk meminimalkan kerugian histeresis dan arus eddy.



Gambar 3. 5. Bahan feromagnetik banyak digunakan dalam peralatan listrik dan komunikasi.

Dalam sistem medan (dimana **fluks tetap konstan**), diperlukan sedikit magnet sisa. Untuk sistem seperti itu, permeabilitas tinggi dan kerapatan fluks saturasi tinggi adalah satu-satunya persyaratan penting yang secara memadai dipenuhi oleh fabrikasi baja tuang atau baja tempa.

Frekuensi yang digunakan dalam jalur komunikasi meluas hingga 10 MHz sedangkan yang digunakan di radio bervariasi dari sekitar 100 kHz hingga 10 GHz. Oleh karena itu, bahan yang memiliki permeabilitas tinggi dan kehilangan yang rendah sangat diinginkan. Untuk aplikasi ini, paduan besi-nikel yang mengandung hingga 80 persen nikel dan sebagian kecil molibdenum atau tembaga, *cold rolled* dan *annealed* sangat cocok.

### 3.3.1 Bahan Magnet Permanen

Magnet permanen dapat digunakan secara luas dalam alat ukur listrik, magnetos, chuck magnet, dan penguas suara koil bergerak, dan lainnya. Dalam magnet permanen, retentivitas tinggi serta koersivitas tinggi paling diinginkan untuk menahan demagnetisasi. Faktanya, produk  $B_r H_c$  adalah kriteria terbaik untuk keunggulan magnet permanen. Bahan yang biasa digunakan untuk tujuan tersebut adalah paduan besi-nikel-aluminium tembaga-kobalt bebas karbon yang dibuat an-isotropik dengan memanaskan hingga suhu yang sangat tinggi dan kemudian didinginkan dalam medan magnet yang kuat. Paduan ini memiliki nilai  $B_r H_c$  sekitar  $40.000 \text{ J/m}^3$  dibandingkan dengan  $2.500 \text{ J/m}^3$  untuk baja kromium.

#### Contoh Soal 1.

Loop histeresis sampel baja lembaran yang dikenakan kerapatan fluks maksimum  $1,3 \text{ Wb/m}^2$  memiliki luas  $93 \text{ cm}^2$ , skala  $1 \text{ cm} = 0,1 \text{ Wb/m}^2$  dan

1 cm = 50 AT/m. Hitung kerugian histeresis dalam watt ketika 1500 cm<sup>3</sup> dari bahan yang sama dikenakan kerapatan fluks bolak-balik 1,3 Wb/m<sup>2</sup> nilai puncak frekuensi 65 Hz.

**Penyelesaian:**

Rugi-rugi =  $xy$  (luas loop  $B/H$ ) J/m<sup>3</sup>/siklus =  $0.1 \times 50 \times 93 = 465$  J/m<sup>3</sup>/siklus

Volume = 1500 cm<sup>3</sup> =  $15 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup> ; Jumlah pembalikan/detik = 65

$W_h = 465 \times 15 \times 10^{-4} \times 65$  J/detik = **45.3 W**

**Catatan.** Ditentukan nilai  $B_{max} = 1.3$  Wb/m<sup>2</sup> tidak diperlukan untuk solusinya.

**Contoh Soal 2.**

Hitung kehilangan energi per jam dalam kWh dalam spesimen besi, yang loop histeresisnya ekuivalen di area 250 J/m<sup>3</sup>. Frekuensi 50 Hz; berat jenis besi 7,5; berat spesimen 10 kg.

**Penyelesaian:**

Rugi histeresis = 250 J/m<sup>3</sup>/siklus, massa besi = 10 kg

Volume spesimen besi =  $10/7.5 \times 10^3$  m<sup>3</sup> =  $10^{-2}/7.5$  m<sup>3</sup>

Jumlah siklus pembalikan/jam =  $60 \times 50 = 3000$

kerugian / jam =  $250 \times (10^{-2}/7.5) \times 3000 = 1000$  J =  $1000/36 \times 10^5 = 27.8 \times 10^{-5}$  kWh

**Contoh Soal 3.**

Loop histeresis untuk bahan magnet tertentu ditarik ke skala berikut: 1 cm = 200 AT/m dan 1 cm = 0,1 Wb/m<sup>2</sup>. Luas lingkaran adalah 48 cm<sup>2</sup>. Dengan asumsi kerapatan material  $7,8 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>, hitung rugi histeresis dalam watt/kg pada 50 Hz.

**Penyelesaian:**

Rugi histeresis =  $xy$  (luas loop  $B/H$ ) J/m<sup>3</sup>/siklus

Maka, 1 cm = 200 AT/m ; 1 cm = 0.1 Wb/m<sup>2</sup>

$x = 200$ ,  $y = 0.1$ , luas loop = 48 cm<sup>2</sup>

Rugi-rugi =  $200 \times 0.1 \times 48 = 960$  J/m<sup>3</sup>/ siklus,

Kerapatan material =  $7,8 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>

Volume material 1 kg = massa/kerapatan =  $1/7.8 \times 10^3$  m<sup>3</sup>

Rugi-rugi =  $960 \times 1/7.8 \times 10^3$  J/siklus

Jumlah pembalikan / detik = 50

Rugi-rugi =  $960 \times 50 \times 10^{-3}/7.8 = 6.15$  J/s atau watt

Rugi histeresis = **6.15 watt/kg.**

#### Contoh Soal 4.

Tentukan rugi histeresis pada inti besi seberat 50 kg yang memiliki massa jenis  $7,8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  bila luas loop histeresis  $150 \text{ cm}^2$ , frekuensi 50 Hz dan skala pada sumbu X dan Y adalah:  $1 \text{ cm} = 30 \text{ AT / cm}$  dan  $1 \text{ cm} = 0,2 \text{ Wb/m}^2$ .

#### Penyelesaian:

Rugi histeresis =  $xy \times (\text{luas loop } B/H) \text{ J/m}^3/\text{siklus}$

$1 \text{ cm} = 30 \text{ AT/cm} = 3000 \text{ AT/m}$  ;  $1 \text{ cm} = 0.2 \text{ Wb/m}^2$

$x = 3000$ ,  $y = 0.2$ ,  $A = 150 \text{ cm}$

Rugi-rugi =  $3000 \times 0.2 \times 150 = 90,000 \text{ J/m}^3/\text{siklus}$

Volume besi 50 kg =  $m/\rho = 50/7.8 \times 10^{-3} = 6.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

Rugi-rugi =  $90,000 \times 6.4 \times 10^{-3} \times 50 = 28,800 \text{ J/s}$  atau dalam watt = **28.8 kW**

#### Contoh Soal 5.

Dalam inti transformator dengan volume  $0,16 \text{ m}^3$ , total kehilangan besi ditemukan  $2.170 \text{ W}$  pada 50 Hz. Loop histeresis bahan inti, diambil ke kerapatan fluks maksimum yang sama, memiliki luas  $9,0 \text{ cm}^2$  jika ditarik ke skala  $1 \text{ cm} = 0,1 \text{ Wb/m}^2$  dan  $1 \text{ cm} = 250 \text{ AT/m}$ . Hitung rugi besi total dalam inti transformator jika diberi energi dengan kerapatan fluks maksimum yang sama tetapi pada frekuensi 60 Hz.

#### Penyelesaian:

$W_h = xy \times (\text{luas loop histeresis})$  dengan x dan y adalah faktor skala.

$W_h = 9 \times 0.1 \times 250 = 225 \text{ J/m}^3/\text{siklus}$

#### Pada 50 Hz

Rugi histeresis =  $225 \times 0.16 \times 50 = 1,800 \text{ W}$  ;

Rugi arus eddy =  $2,170 - 1800 = 370 \text{ W}$

#### Pada 60 Hz

Rugi histeresis =  $1800 \times 60/50 = 2,160 \text{ W}$  ;

Rugi arus eddy =  $370 \times (60/50)^2 = 533 \text{ W}$

Total rugi besi =  $2,160 + 533 = \mathbf{2,693 \text{ W}}$

### 3.3.2 Hukum Histeresis Steinmetz

Secara eksperimental ditemukan oleh **Steinmetz** bahwa kerugian histeresis per  $m^3$  per siklus magnetisasi material magnet bergantung pada:

- (i) kerapatan fluks maksimum yang ditetapkan di dalamnya yaitu  $B_{max}$  dan
- (ii) kualitas bahan magnetis.

$$\text{Rugi histeresis } W_h \propto B_{max}^{1,6} \frac{\text{joule/m}^3}{\text{siklus}} = \eta B_{max}^{1,6} \frac{\text{joule}}{\text{m}^3} \text{ siklus} \quad (5)$$

Dengan  $\eta$  adalah konstanta yang bergantung pada sifat material magnetis dan dikenal sebagai **koefisien histeresis Steinmetz**. **Indeks 1.6** adalah empiris dan berlaku jika nilai  $B_{max}$  berada di antara 0.1 dan 1.2 Wb/m<sup>2</sup>. Jika  $B_{max}$  lebih kecil dari 0,1 Wb/m<sup>2</sup> atau lebih besar dari 1,2 Wb/m<sup>2</sup>, indeksnya lebih besar dari 1,6.

Maka,

$$W_h = \eta B_{max}^{1,6} fV \frac{J}{s} \text{ atau watt} \quad (6)$$

dimana  $f$  adalah frekuensi pembalikan magnetisasi dan  $V$  adalah volume bahan magnet.

Jangkar motor listrik dan generator dan inti transformator dan lainnya, yang mengalami pembalikan cepat magnetisasi harus, jelas, terbuat dari zat yang memiliki koefisien histeresis rendah untuk mengurangi kerugian histeresis.

#### Contoh Soal 6.

Sebuah silinder besi dengan volume  $8 \times 10^{-3} m^3$  berputar selama 20 menit dengan kecepatan 3.000 r.p.m dalam bidang dua kutub dengan kerapatan fluks 0,8 Wb/m<sup>2</sup>. Jika koefisien histeresis besi adalah 753,6 joule/m<sup>3</sup>, kalor jenis besi adalah 0,11, kerugian akibat arus eddy sama dengan yang terjadi akibat histeresis dan 25% panas yang dihasilkan hilang oleh radiasi, cari kenaikan suhu besi. Ambil massa jenis besi sebagai  $7,8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

#### Penyelesaian:

Sebuah dinamo yang berputar dalam medan multipolar mengalami satu pembalikan magnet setelah melewati sepasang kutub. Dengan kata lain, jumlah pembalikan magnet sama dengan jumlah pasangan kutub. Jika  $P$  adalah jumlah kutub, pembalikan magnet dalam satu putaran adalah  $P/2$ .

Jika kecepatan putaran jangkar adalah  $N$  rpm, maka banyaknya putaran/detik =  $N/60$ .

Jumlah pembalikan/detik

$$= \text{pembalikan dalam satu putaran} \times \text{Jumlah putaran / detik}$$

$$= \frac{P}{2} \times \frac{N}{60} = \frac{PN}{120} \text{ pembalikan / detik}$$

Maka,

$$N = 3.000 \text{ rpm}; P = 2$$

Sehingga,

$$f = \frac{3.000 \times 2}{120} = 50 \text{ pembalikan / detik}$$

Menurut **hukum histeresis Steinmetz**,

$$W_h = \eta B_{max}^{1,6} fV \text{ watt}$$

Perhatikan bahwa  $f$  di sini adalah singkatan dari pembalikan magnet/detik dan bukan untuk rotasi jangkar frekuensi mekanis.

$$W_h = 753.6 \times (0.8)^{1,6} \times 50 \times 8 \times 10^{-3} = 211 \text{ J/s}$$

$$\text{Rugi dalam 20 menit} = 211 \times 1,200 = 253.2 \times 10^3 \text{ J}$$

$$\text{Rugi arus eddy} = 253.2 \times 10^3 \text{ J};$$

$$\text{Rugi total} = 506.4 \times 10^3 \text{ J}$$

$$\text{Panas dihasilkan} = 506.4 \times 10^3 / 4200 = 120.57 \text{ kcal};$$

$$\text{Pemanfaatan panas} = 120.57 \times 0.75 = 90.43 \text{ kcal}$$

$$\text{Panas diserap oleh besi} = (8 \times 10^{-3} \times 7.8 \times 10^3) \times 0.11 t \text{ kcal}$$

$$\therefore (8 \times 10^{-3} \times 7.8 \times 10^3) \times 0.11 \times t = 90.43 \therefore t = \mathbf{13.17^\circ C}$$

### Contoh Soal 7.

Luas loop histeresis yang diperoleh dengan spesimen besi tertentu adalah  $9,3 \text{ cm}^2$ . Koordinatnya sedemikian sehingga  $1 \text{ cm} = 1.000 \text{ AT/m}$  dan  $1 \text{ cm} = 0,2 \text{ Wb/m}^2$ .

Hitung:

- rugi histeresis per  $\text{m}^3$  per siklus dan
- rugi histeresis per  $\text{m}^3$  pada frekuensi  $50 \text{ Hz}$  jika kerapatan fluks maksimum adalah  $1,5 \text{ Wb/m}^2$ .
- hitung rugi histeresis per  $\text{m}^3$  untuk kerapatan fluks maksimum  $1.2 \text{ Wb/m}^2$  dan frekuensi  $30 \text{ Hz}$ , dengan asumsi rugi sebanding dengan  $B_{max}^{1,6}$ .

**Penyelesaian:**

(a)  $W_h = xy \times (\text{luas loop B/H}) = 1,000 \times 0.2 \times 9.3 = 1860 \text{ J/m}^2/\text{siklus}$

(b)  $W_h = 1,860 \times 50 \text{ J/s/m}^3 = 93,000 \text{ W/m}^3$

(c)  $W_h = B_{max}^{1,8} f V W$ . Untuk spesimen tertentu,  $W_h \propto B_{max}^{1,8} f$   
Pada (b) diatas,

$$93.000 \propto 1,5^{1,8} \times 50$$

dan,

$$\begin{aligned} W_h &\propto 1,2^{1,8} \times 30 \\ \therefore \frac{W_h}{93.000} &= \left(\frac{1,2}{1,5}\right)^{1,8} \times \frac{30}{50} \\ W_h &= 93.000 \times 0,669 \times 0,6 = 37.360 \end{aligned}$$

**3.3.3 Daya Angkat Magnet**

Dalam Gambar 3.7, misalkan,  $P$  = gaya tarik dalam newton antara dua kutub dan  $A$  = luas kutub dalam  $\text{m}^2$ .

Jika salah satu kutub (katakanlah, yang paling atas) ditarik terpisah melawan gaya tarik ini melalui jarak  $dx$  meter, maka usaha yang dilakukan =  $P \times dx$  joule.

Pekerjaan ini berfungsi untuk menyediakan energi untuk volume tambahan dari medan magnet yang dibuat.

Volume tambahan dari medan magnet yang dibuat adalah

$$= A \times dx \text{ m}^3$$

Tingkat kebutuhan energi adalah

$$= \frac{B^2}{2\mu_0} \text{ joule/m}^3 \tag{7}$$

$\therefore$  energi yang dibutuhkan untuk volume baru

$$= \frac{B^2}{2\mu_0} \times A dx \tag{8}$$

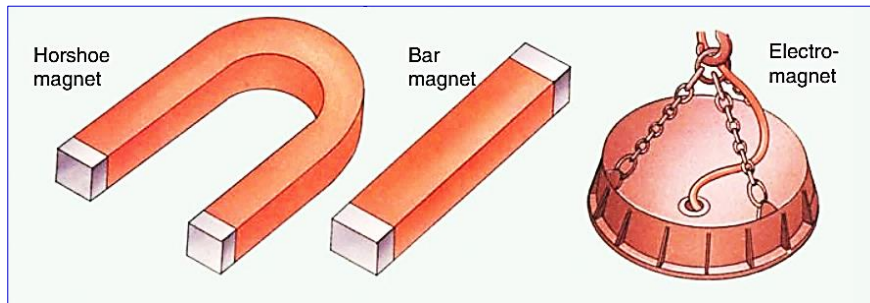
Menyamakan (i) dan (ii), kita dapatkan,

$$P \cdot dx = \frac{B^2 \times A dx}{2 \mu_0}$$

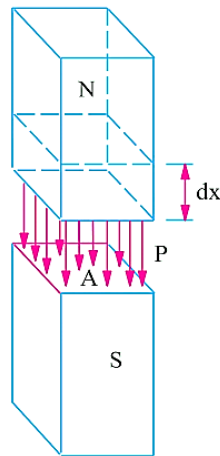
$$P = \frac{B^2 A}{2 \mu_0} N = 4.00.000 \frac{B^2}{A} N$$

$$P = \frac{B^2 A}{2 \mu_0} N/m^2 = 4.00.000 B^2 N/m^2$$

$$P = \frac{B^2 A}{9,81 \times 2 \mu_0} = \frac{B^2 A}{19,62 \mu_0} \text{ kg - wt} \quad (9)$$



Gambar 3. 6. Beragam bentuk magnet.



Gambar 3. 7. Gaya tarik di antara dua kutub  $U$  dan  $S$ .

### Contoh Soal 8.

Luas permukaan kutub elektromagnet adalah  $0,5 \text{ m}^2/\text{kutub}$ . Harus mengangkat in-got besi seberat  $1000 \text{ kg}$ . Jika permukaan tiang sejajar dengan permukaan in-got pada jarak  $1 \text{ milimeter}$ , tentukan m.m.f. yg dibutuhkan. Asumsikan permeabilitas besi tak terhingga pada permeabilitas ruang bebas adalah  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ .

**Penyelesaian:**

Karena besi memiliki permeabilitas tak terhingga, menyebabkan reluktansi nol terhadap fluks magnet.

$$\text{Gaya pada dua kutub} = 2 \times B^2 A / 2\mu_0 = B^2 A / \mu_0$$

$$\therefore B^2 \times 0.5 / 4 \pi \times 10^{-7} = 1000 \times 9.8, B = 0.157 \text{ Wb/m}^2$$

$$\therefore H = 0.157 / 4\pi \times 10^{-7} = 125 \times 10^3 \text{ AT/m},$$

$$l = 2 \times 1 = 2 \text{ mm} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\therefore \text{mmf Ampere-turn (AT) yang diperlukan} = 125 \times 10^3 \times 2 \times 10^{-3} = \mathbf{250}.$$

**Contoh Soal 9.**

Sebuah cincin besi lunak dengan keliling rata-rata 40 cm dan luas penampang 3 cm<sup>2</sup> memiliki dua potongan gergaji radial yang dibuat pada titik-titik yang berlawanan secara diametris. Pelat kuningan setebal 0,5 mm dimasukkan di setiap celah. Cincin itu dililitkan dengan 800 lilitan.

Hitung kebocoran magnet dan fringing. Asumsikan data berikut untuk besi lunak:

B (Wb/m <sup>2</sup> ):	0.76	1.13	1.31	1.41	1.5
H (AT/m):	50	100	150	200	250

**Penyelesaian:**

Perlu diperhatikan bahwa kuningan merupakan bahan non magnet.

$$\text{Gaya pada satu sisi terpisah} = B^2 A / 2\mu_0 \text{ newton.}$$

$$\text{Gaya pada kedua sisi terpisah} = B^2 A / \mu_0 \text{ newton.}$$

$$\text{Maka, } F = 12 \text{ kg wt} = 12 \times 9.81 = 117.7 \text{ N}$$

$$\therefore 117.7 = B^2 \times 3 \times 10^{-4} / 4\pi \times 10^{-7}; B = 0.7 \text{ Wb/m}^2$$

Jika dibuat kurva  $B/H$ , maka diperoleh  $B = 0.7 \text{ Wb/m}^2$ , nilai  $H = 45 \text{ AT/m}$ .

Maka, panjang jalur besi = 40 cm = 0.4 m.

$$\text{mmf AT yang diperlukan untuk jalur besi} = 45 \times 0.4 = 18$$

Nilai  $H$  di pelat kuningan non-magnetis

$$= B / \mu_0 = 0.7 / 4\pi \times 10^{-7} = 557,042 \text{ AT/m}$$

$$\text{Ketebalan total pelat kuningan} = 0.5 \times 2 = 1 \text{ mm}$$

$$\text{AT yang diperlukan} = 557,042 \times 1 \times 10^{-3} = 557$$

$$\text{Total AT yang dibutuhkan} = 18 + 557 = 575$$

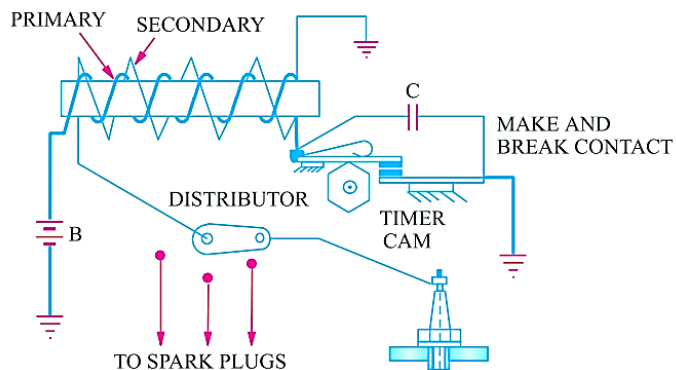
$$\therefore \text{ arus magnetisasi diperlukan} = 575 / 800 = \mathbf{0.72 \text{ A}}$$

### 3.3.4 Sistem Pengapian Mobil

Penerapan praktis induksi timbal balik ditemukan dalam sistem pengapian mesin bensin dengan percikan tunggal yang banyak digunakan di mobil dan mesin udara. Gambar 3.8 menunjukkan diagram sirkuit dari sistem seperti yang diterapkan pada mesin mobil 4 silinder.

Ini memiliki kumparan percikan (atau kumparan induksi) yang terdiri dari gulungan primer (dari beberapa putaran) dan gulungan sekunder (dari sejumlah besar putaran) pada inti besi umum (untuk meningkatkan induksi timbal balik). Sirkuit utama (berisi baterai B) termasuk 'kontak buat dan putus' yang digerakkan oleh kamera pengatur waktu. Sirkuit sekunder termasuk pisau putar distributor dan celah percikan di busi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8.

Bubungan pengatur waktu dan distributor dipasang pada poros yang sama dan diarahkan untuk berputar tepat pada setengah kecepatan poros mesin. Ini berarti bahwa dalam kasus mesin mobil (yang merupakan mesin empat siklus) setiap silinder hanya ditembakkan satu kali untuk setiap dua putaran poros mesin.



Gambar 3. 8. Sistem pengapian mesin mobil.

### 3.3.5 Kerja Sistem Pengapian Mesin Mobil

Saat *cam timer* berputar, secara bergantian menutup dan membuka sirkuit utama. Selama sirkuit primer ditutup, arus yang melaluinya naik secara eksponensial seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8 dan begitu pula medan magnet dari belitan primer.

Ketika bubungan tiba-tiba membuka sirkuit primer, medan magnet runtuh dengan cepat sehingga menghasilkan ggl yang sangat besar. di sekunder dengan induksi bersama. Selama ini emf besar ini ada, pisau distributor berputar dan menghubungkan belitan sekunder melintasi busi yang tepat dan sirkuit sekunder diselesaikan kecuali untuk celah spart di busi. Namun, e.m.f. cukup besar untuk membuat arus melompati celah sehingga menghasilkan percikan yang menyulut campuran eksplosif di silinder mesin.

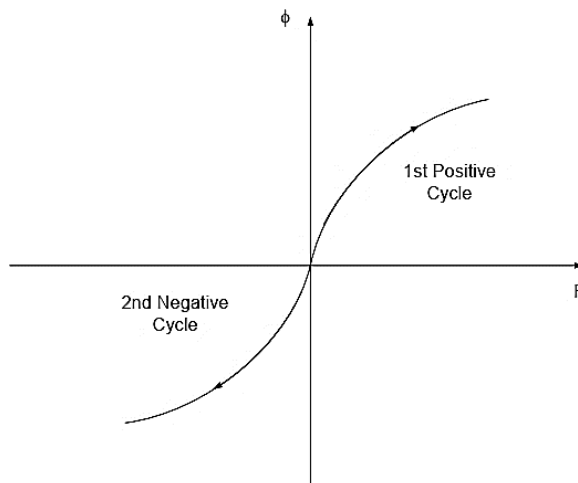
Fungsi kapasitor  $C$  yang terhubung melintasi kontak 'sambung dan putus' adalah menggandakan dua kalinya:

- (i) untuk membuat *break* cepat sehingga emf besar diinduksi di sekunder dan
- (ii) untuk mengurangi percikan dan pembakaran pada kontak 'make-and-break' sehingga memperpanjang hidup kontak.

### 3.4 Kehilangan Energi dalam Inti Ferromagnetik

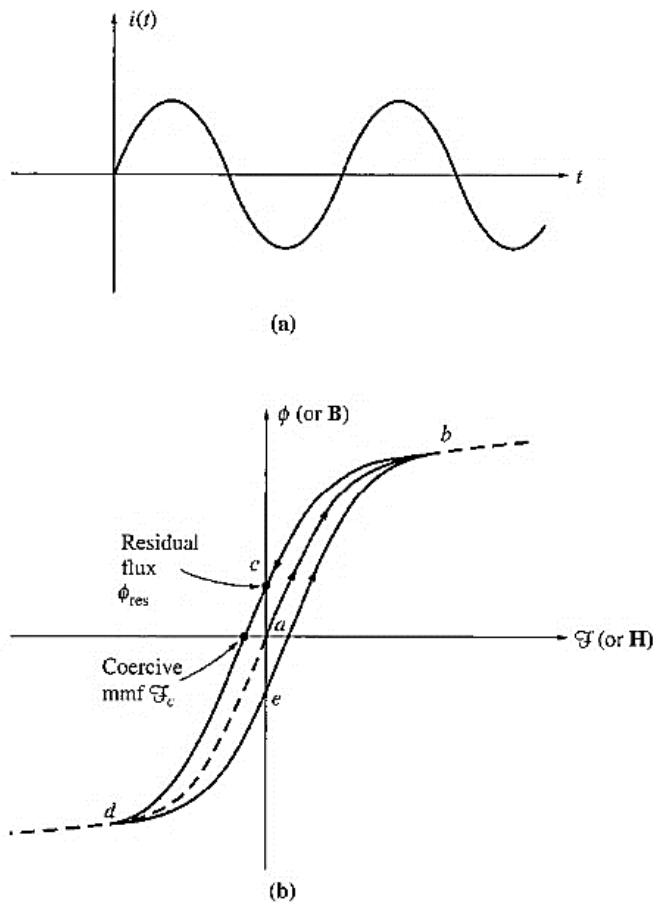
#### 3.4.1 Rugi Histeresis

1. Pembahasan yang dilakukan sebelumnya berkonsentrasi pada penerapan arus dc melalui kumparan. Sekarang mari kita bahas penerapan sumber arus ac pada koil. Menggunakan pemahaman kita sebelumnya, kita dapat memprediksi bahwa kurva akan seperti yang ditunjukkan,



Gambar 3. 9. Perilaku magnet ac teoretis untuk fluks dalam inti ferromagnetik.

2. Sayangnya, asumsi di atas hanya benar asalkan inti adalah 'sempurna' yaitu tidak ada fluks sisa selama siklus negatif aliran arus ac. Perilaku fluks yang khas (atau dikenal sebagai loop histeresis) dalam inti feromagnetik adalah seperti yang ditunjukkan pada halaman berikutnya.



Gambar 3. 10. Loop histeresis tipikal ketika arus ac diterapkan.

**Penjelasan loop histeresis:**

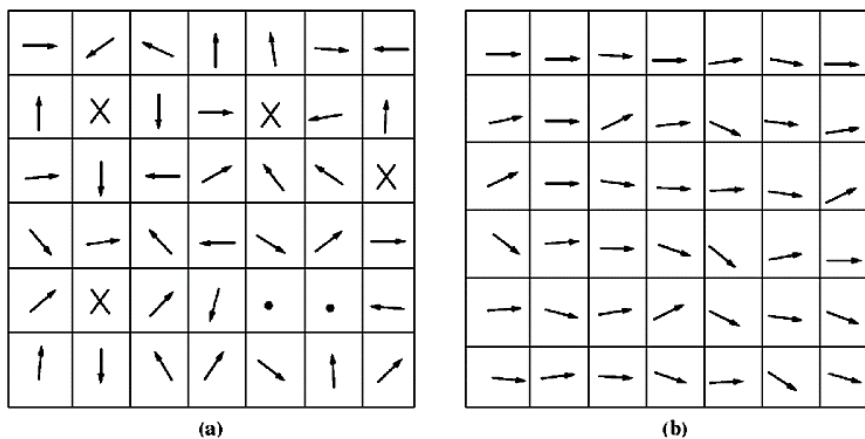
- Terapkan arus ac. Asumsikan fluks di inti awalnya nol.
- Saat arus meningkat, fluks menelusuri jalur **ab**. (kurva saturasi)
- Saat arus berkurang, fluks menelusuri jalur yang berbeda dari jalur saat arus meningkat.
- Ketika arus berkurang, fluks menelusuri jalur **bcd**.
- Ketika arus meningkat lagi, fluks menelusuri jalur **deb**.

- *Catatan*: jumlah fluks yang ada dalam inti tidak hanya bergantung pada jumlah arus yang diterapkan pada belitan inti, tetapi juga pada riwayat fluks sebelumnya pada inti.
- *Histeresis* adalah ketergantungan pada riwayat fluks sebelumnya dan mengakibatkan kegagalan untuk menelusuri kembali jalur fluks.
- Jika  $mmf$  besar pertama kali diterapkan pada inti dan kemudian dilepas, jalur fluks di teras akan menjadi *abc*.
- Saat  $mmf$  dihilangkan, fluks tidak menuju nol - **fluks sisa**. Beginilah cara magnet permanen diproduksi.
- Untuk memaksa fluks ke nol, sejumlah  $mmf$  yang dikenal sebagai *mmf koersif* harus diterapkan dalam arah yang berlawanan.

### 3.4.2 Mengapa histeresis terjadi?

- Untuk memahami histeresis dalam inti feromagnetik, kita harus melihat perilaku struktur atomnya sebelum, selama, dan setelah adanya medan magnet.
- Atom besi dan logam serupa (kobalt, nikel, dan beberapa paduannya) cenderung memiliki medan magnet yang sejajar satu sama lain. Di dalam logam, terdapat wilayah kecil yang disebut domain di mana di setiap domain terdapat medan magnet kecil yang sejajar secara acak melalui struktur logam.

Seperti yang ditunjukkan di bawah ini.



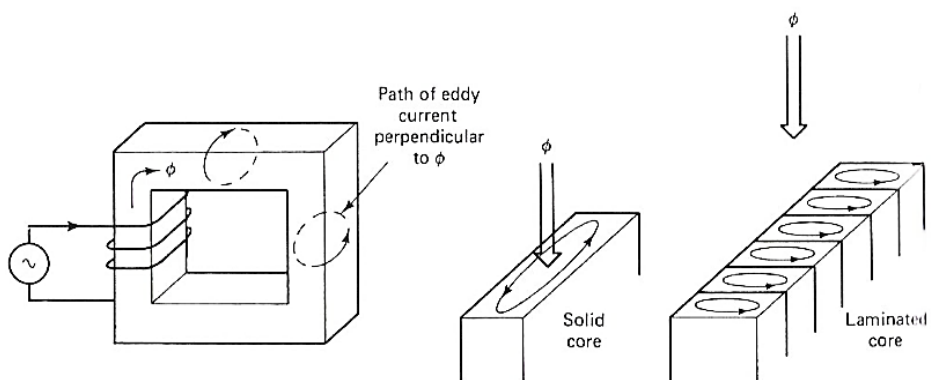
Gambar 3. 11. (a) Domain magnetik berorientasi secara acak. (b) Domain magnet berbaris di hadapan medan magnet eksternal.

- Arah medan magnet di setiap domain adalah acak sehingga medan magnet bersih adalah nol.
- Jika mmf diterapkan pada inti, setiap medan magnet akan sejajar dengan arah medan magnet. Itu menjelaskan peningkatan eksponensial fluks magnet selama tahap awal magnetisasi. Karena semakin banyak domain yang selaras dengan medan magnet, fluks magnet total akan dipertahankan pada tingkat yang konstan seperti yang ditunjukkan dalam kurva magnetisasi (saturasi).
- Ketika mmf dihilangkan, medan magnet di setiap domain akan mencoba kembali ke keadaan acaknya.
- Namun, tidak semua domain medan magnet akan kembali ke keadaan acaknya sehingga tetap pada posisi medan magnet sebelumnya. Hal ini disebabkan kurangnya energi yang dibutuhkan untuk mengganggu kesejajaran medan magnet.
- Oleh karena itu, material akan mempertahankan beberapa sifat magnetnya (magnet permanen) hingga energi eksternal dialirkan ke material. Contoh energi eksternal dapat berupa panas atau kejutan mekanis yang besar. Itulah sebabnya magnet permanen bisa kehilangan magnetnya jika dijatuhkan, dipukul dengan palu atau dipanaskan.
- Oleh karena itu, dalam situasi arus ac, untuk menyatel kembali medan magnet di setiap domain selama siklus yang berlawanan akan membutuhkan mmf ekstra (juga dikenal sebagai *mmf koersif*).
- Kebutuhan energi ekstra ini dikenal sebagai **rugi histeresis**.
- Semakin besar material, semakin banyak energi yang dibutuhkan maka semakin tinggi kerugian histeresis.
- Area yang tertutup dalam loop histeresis yang dibentuk dengan menerapkan arus ac ke inti berbanding lurus dengan energi yang hilang dalam siklus ac tertentu.

### 3.4.3 Rugi Arus Eddy

1. Fluks yang berubah setiap saat akan menginduksi tegangan dalam inti feromagnetik.
2. Tegangan ini menyebabkan pusaran arus mengalir di dalam inti - arus pusar (arus eddy).

3. Energi hilang (dalam bentuk panas) karena arus eddy ini mengalir dalam material resistif (besi).
4. Jumlah energi yang hilang karena arus eddy sebanding dengan ukuran lintasan yang mereka ikuti di dalam inti.
5. Untuk mengurangi kehilangan energi, inti feromagnetik harus dipecah menjadi strip kecil, atau laminasi, dan membangun inti dari strip tersebut. Oksida atau resin isolasi digunakan di antara strip, sehingga jalur arus untuk arus eddy terbatas pada area kecil.



Gambar 3. 12. Arus eddy dan laminasi inti.

### Kesimpulan:

Rugi-rugi inti sangat penting dalam praktiknya, karena sangat memengaruhi suhu pengoperasian, efisiensi, dan peringkat perangkat magnet.

### 3.5 Soal Latihan

1. Luas lingkaran histeresis suatu material adalah  $30 \text{ cm}^2$ . Skala koordinatnya adalah:  $1 \text{ cm} = 0,4 \text{ Wb/m}^2$  dan  $1 \text{ cm} = 400 \text{ AT/m}$ . Tentukan kehilangan daya histeresis jika  $1,2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  material mengalami kerapatan fluks bolak-balik pada  $50 \text{ Hz}$ . [Jawab:  $288 \text{ W}$ ]
2. Hitung kehilangan energi yang disebabkan oleh histeresis dalam satu jam dalam  $50 \text{ kg}$  besi saat mengalami perubahan magnet siklik. Frekuensinya  $25 \text{ Hz}$ , luas loop histeresis mewakili  $240 \text{ joules/m}^3$  dan massa jenis besi adalah  $7800 \text{ kg/m}^3$ . [Jawab:  $138,240$ ]
3. Pada transformator tertentu, rugi histeresis adalah  $300 \text{ W}$  ketika kerapatan fluks maksimum  $B_{max} = 0,9 \text{ Wb/m}^2$  dan frekuensi  $50 \text{ Hz}$ .

Berapakah rugi-rugi histeresis jika kerapatan fluks maksimum ditingkatkan menjadi  $1,1 \text{ Wb/m}^2$  dan frekuensi dikurangi menjadi 40 Hz. Asumsikan kerugian histeresis pada kisaran ini sebanding  $B_{\max}^{1,7}$ .  
[Jawab: 337 W]

4. Pada transformator, rugi-rugi histeresis adalah 160 W ketika nilai  $B_{\max} = 1,1 \text{ Wb/m}^2$  dan ketika frekuensi suplai 60 Hz. Berapa kerugiannya bila nilai  $B_{\max}$  dikurangi menjadi  $0,9 \text{ Wb/m}^2$  dan frekuensi suplai dikurangi menjadi 50 Hz. [Jawab: 97 W]
5. Solenoida dengan inti udara memiliki panjang 50 cm dan diameter 2 cm. Hitung induktansinya jika memiliki 1.000 lilitan dan juga tentukan energi yang tersimpan di dalamnya jika arus naik dari nol menjadi 5 A. [Jawab: 0.7 mH; 8.7 mJ]
6. Solenoida berinti udara dengan panjang 1 m dan diameter 10 cm memiliki 5000 lilitan. Hitung (i) induktansi diri (ii) energi yang tersimpan dalam medan magnet ketika arus 2 A mengalir di solenoida. [Jawab: (i) 0.2468 H (ii) 0.4936 J]
7. Tentukan gaya yang diperlukan untuk memisahkan dua permukaan magnet dengan luas kontak  $100 \text{ cm}^2$  jika rapat fluks magnet di seluruh permukaan adalah  $0,1 \text{ Wb/m}^2$ . Turunkan rumus yang digunakan, jika ada. [Jawab: 39.8 N]

# **BAB 4**

## **DASAR ELEKTROMAGNETIK**

### **4.1 Pendahuluan**

Dalam bab ini akan dijelaskan hukum-hukum dasar elektromagnetik yang terdiri dari:

- Hukum Ampere.
- Hukum Faraday.
- Hukum Lenz.

### **4.2 Dasar Elektromagnetik**

#### **4.2.1 Hubungan Antara Magnet dan Listrik**

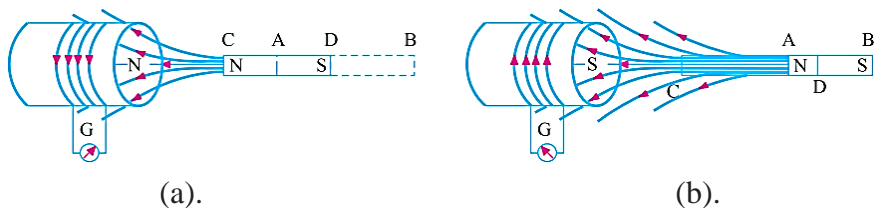
Diketahui dengan baik bahwa setiap kali arus listrik mengalir melalui konduktor, medan magnet segera muncul di ruang yang mengelilingi konduktor. Dapat dikatakan bahwa ketika elektron sedang bergerak, mereka menghasilkan medan magnet. Kebalikannya juga benar, yaitu ketika medan magnet yang merangkul konduktor bergerak relatif terhadap konduktor, ia menghasilkan aliran elektron dalam konduktor. Fenomena dimana sebuah e.m.f. dan karenanya arus (yaitu aliran elektron) diinduksi dalam setiap konduktor yang dipotong atau dipotong oleh fluks magnet yang dikenal sebagai induksi elektromagnetik. Latar belakang sejarah dari fenomena ini adalah:

Setelah penemuan (oleh Oersted) bahwa arus listrik menghasilkan medan magnet, para ilmuwan mulai mencari fenomena sebaliknya dari sekitar tahun 1821 dan seterusnya. Masalah yang mereka hadapi adalah bagaimana 'mengubah' magnet menjadi listrik. Tercatat bahwa Michael Faraday memiliki kebiasaan berjalan-jalan dengan magnet di sakunya untuk terus mengingatkannya tentang masalah tersebut.

Setelah sembilan tahun penelitian dan eksperimen berkelanjutan, ia berhasil menghasilkan listrik dengan 'mengubah magnet'. Pada tahun 1831, ia merumuskan hukum dasar yang mendasari fenomena induksi elektromagnetik (dikenal setelah namanya), yang mendasari pengoperasian sebagian besar peralatan komersial seperti motor, generator dan transformator, dan lainnya.

### 4.2.2 EMF dan Arus Induksi

Pada Gambar 4.1 ditunjukkan kumparan berinsulasi yang terminalnya dihubungkan ke galvanometer sensitif  $G$ . Ini ditempatkan dekat dengan magnet batang stasioner pada awalnya pada posisi  $AB$  (diperlihatkan titik-titik). Seperti yang terlihat, beberapa fluks dari kutub  $N$  magnet dihubungkan dengan atau disambungkan melalui kumparan tetapi, belum ada defleksi dari galvanometer. Sekarang, misalkan magnet tiba-tiba didekatkan ke koil pada posisi  $CD$  (lihat Gambar 4.1(a)). Kemudian, ditemukan adanya sentakan atau defleksi yang tiba-tiba tetapi sesaat



Gambar 4. 1. Perubahan defleksi galvanometer akibat perubahan medan magnet.

di galvanometer dan ini berlangsung selama magnet bergerak relatif terhadap kumparan, bukan sebaliknya. Defleksi berkurang menjadi nol ketika magnet kembali diam pada posisi barunya  $CD$ . Perlu dicatat bahwa karena pendekatan magnet, fluks yang dihubungkan dengan kumparan meningkat.

Selanjutnya, magnet secara tiba-tiba ditarik menjauh dari kumparan seperti pada Gambar 4.1(b). Diketahui bahwa lagi-lagi ada defleksi sesaat di galvanometer dan terus berlangsung selama magnet bergerak, bukan saat menjadi diam. Penting untuk dicatat bahwa defleksi ini berlawanan arah seperti diperlihatkan pada Gambar 4.1. Jelas, karena penarikan magnet, fluks yang dihubungkan dengan kumparan berkurang.

Defleksi galvanometer menunjukkan produksi e.m.f. di koil. Satu-satunya penyebab produksi dapat berupa pendekatan tiba-tiba atau penarikan magnet dari kumparan. Diketahui bahwa penyebab sebenarnya dari e.m.f. adalah perubahan fluks yang terlingkup dalam kumparan. E.m.f. ini ada selama perubahan fluks ada. Fluks stasioner (diam), betapapun kuatnya, tidak akan pernah menyebabkan e.m.f. di konduktor yang diam. Faktanya, hasil yang sama dapat diperoleh dengan menjaga magnet batang

diam dan menggerakkan kumparan secara tiba-tiba menjauhi atau mendekati magnet.

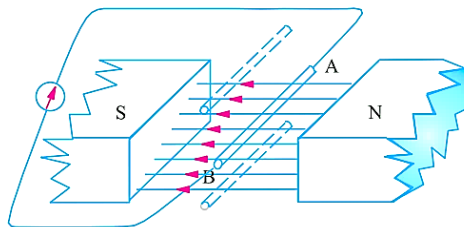
Arah e.m.f yang diinduksi secara elektromagnetik ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.

Produksi e.m.f yang diinduksi secara elektromagnetik ini selanjutnya diilustrasikan dengan mempertimbangkan konduktor **AB** yang terletak di dalam medan magnet dan dihubungkan ke galvanometer seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.

Diketahui bahwa setiap kali konduktor ini digerakkan ke atas atau ke bawah, defleksi sesaat dihasilkan di galvanometer. Ini berarti bahwa beberapa e.m.f. diinduksi di **AB**. Besarnya e.m.f. (dan karenanya jumlah defleksi pada galvanometer) tergantung pada kecepatan pergerakan **AB**.

Dari percobaan ini dapat disimpulkan bahwa setiap kali konduktor memotong atau menggeser fluks magnet, sebuah e.m.f. selalu diinduksi di dalam konduktor.

Diketahui juga bahwa jika konduktor digerakkan sejajar arah fluks sehingga tidak memotongnya, maka tidak ada e.m.f. diinduksi di dalamnya.



Gambar 4. 2. Konduktor yang digerakkan dalam medan magnet.

### 4.2.3 Prinsip Medan Magnetik

Seperti yang dinyatakan sebelumnya, medan magnet adalah mekanisme fundamental dimana energi diubah dari satu bentuk ke bentuk lain di motor, generator, dan transformator. Empat prinsip dasar menjelaskan bagaimana medan magnet digunakan dalam peralatan berikut ini.

1. Kawat yang menghantarkan arus listrik menghasilkan medan magnet di sekitar kawat tersebut.
2. Medan magnet yang berubah terhadap waktu akan menginduksi tegangan pada kawat kumparan jika medan magnet melewati kumparan tersebut. (Ini adalah dasar dari prinsip transformator).

3. Sebuah kawat penghantar arus dalam medan magnet akan memiliki gaya yang diinduksi padanya. (Ini adalah dasar dari aksi motor.)
4. Sebuah kawat yang bergerak dalam medan magnet akan memiliki tegangan yang diinduksi di dalamnya. (Ini adalah dasar dari aksi generator.)

#### 4.2.4 Sumber Medan Magnetik

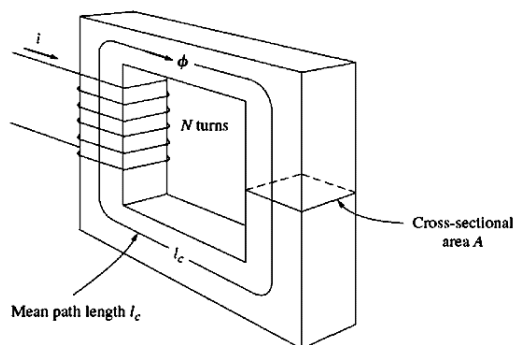
Hukum dasar yang mengatur sumber medan magnet akibat arus adalah hukum Ampere:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{net} \quad (1)$$

dimana  $H$  adalah intensitas medan magnet yang dihasilkan oleh arus  $I_{net}$  dan  $d\mathbf{l}$  adalah elemen diferensial dengan panjang sepanjang jalur integral. Dalam satuan SI,  $I$  diukur dalam ampere dan  $H$  diukur dalam satuan ampere per meter. Untuk lebih memahami arti persamaan ini, akan sangat membantu jika diterapkan pada contoh sederhana di Gambar 4.3.

Gambar 4.3 menunjukkan inti persegi panjang dengan belitan kawat  $N$  yang dililitkan di sekitar salah satu kaki inti. Jika inti terbuat dari besi atau logam sejenis lainnya (secara kolektif disebut bahan ferromagnetik), pada dasarnya semua medan magnet yang dihasilkan oleh arus akan tetap berada di dalam inti, sehingga jalur integrasi dalam hukum Ampere adalah jalur rata-rata panjang inti  $l_c$ . Arus yang lewat dalam jalur integrasi  $I_{net}$  selanjutnya adalah  $Ni$ , karena kumparan kawat memotong jalur integrasi  $N$  kali sambil membawa arus  $i$ . Sehingga hukum Ampere menjadi

$$Hl_c = Ni \quad (2)$$



Gambar 4. 3. Inti magnet sederhana.

Di sini  $H$  adalah besarnya vektor intensitas medan magnet  $H$ . Oleh karena itu, besarnya atau intensitas medan magnet di inti akibat arus yang diberikan adalah

$$H = \frac{Ni}{l_c} \quad (3)$$

Intensitas medan magnet  $H$  dalam artian adalah ukuran dari "usaha" yang dimasukkan arus ke dalam pembentukan medan magnet. Kekuatan inti medan magnet yang dihasilkan dalam inti juga bergantung pada bahan inti.

Hubungan antara intensitas medan magnet  $H$  dan kerapatan fluks magnet  $B$  yang dihasilkan yang dihasilkan dalam suatu bahan diberikan oleh

$$B = \mu H \quad (4)$$

dimana:

$H$  = intensitas medan magnet

$\mu$  = permeabilitas magnetik material

$B$  = kerapatan fluks magnet yang dihasilkan

Kerapatan fluks magnet aktual yang dihasilkan dalam sepotong bahan diberikan oleh produk dari dua istilah berikut:

$H$ , mewakili upaya yang diberikan oleh arus untuk membentuk medan magnet  $\mu$ , mewakili permeabilitas relatif pembentukan medan magnet dalam material tertentu.

Satuan intensitas medan magnet adalah *ampere-turn* per meter, satuan permeabilitas adalah *henri* per meter, dan satuan kerapatan fluks yang dihasilkan adalah *weber* per meter persegi yang dikenal dengan *tesla* ( $T$ ).

Permeabilitas ruang bebas disebut  $\mu_o$ , dan nilainya adalah

$$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m} \quad (5)$$

Permeabilitas bahan lain dibandingkan dengan permeabilitas ruang bebas disebut **permeabilitas relatif**:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_o} \quad (6)$$

Permeabilitas relatif adalah cara mudah untuk membandingkan daya tarik material. Misalnya, baja yang digunakan pada mesin modern memiliki permeabilitas relatif 2000 hingga 6000 atau bahkan lebih. Ini berarti bahwa, untuk jumlah arus tertentu, 2000 hingga 6000 kali lebih banyak fluks yang

terbentuk di sepotong baja daripada di area udara. (Permeabilitas udara pada dasarnya sama dengan permeabilitas ruang bebas.) Jelas, logam dalam transformator atau inti motor memainkan peran yang sangat penting dalam meningkatkan dan memusatkan fluks magnet di peralatan.

Juga, karena permeabilitas besi jauh lebih tinggi daripada udara, sebagian besar fluks dalam inti besi seperti pada Gambar 4.3 tetap berada di dalam inti alih-alih bergerak melalui udara sekitarnya, yang jauh lebih rendah permeabilitasnya. Fluks bocor kecil yang meninggalkan inti besi sangat penting dalam menentukan hubungan fluks antara kumparan dan induktansi sendiri kumparan pada transformator dan motor.

Dalam inti seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3, besarnya kerapatan fluks ditentukan oleh:

$$B = \mu H = \frac{\mu N i}{l_c} \quad (7)$$

Sekarang fluks total di area tertentu diberikan oleh:

$$\phi = \int_A B dA \quad (8)$$

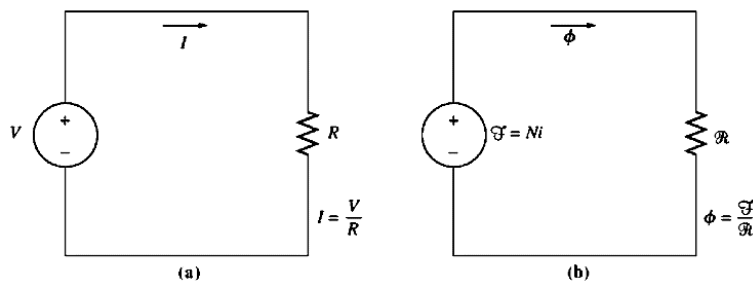
dimana  $dA$  adalah satuan luas diferensial. Jika vektor kerapatan fluks tegak lurus terhadap bidang luas  $A$ , dan jika kerapatan fluks **konstan** di seluruh area, maka persamaan ini berkurang menjadi:

$$\phi = BA \quad (9)$$

Jadi, fluks total dalam inti pada Gambar 4 karena arus  $i$  pada belitan adalah:

$$\phi = BA = \frac{\mu N i A}{l_c} \quad (10)$$

dimana  $A$  adalah luas penampang inti.



Gambar 4. 4. (a) Rangkaian listrik sederhana. (b) Rangkaian magnetik analog ke inti transformator.

### 4.3 Rangkaian Magnetik

Dalam Persamaan (10) kita melihat bahwa arus dalam kumparan kawat yang melilit inti menghasilkan inti magnet di inti. Ini dalam arti tertentu analog dengan tegangan dalam rangkaian listrik yang menghasilkan arus. Dimungkinkan untuk mendefinisikan "rangkaian magnet" yang perilakunya diatur oleh persamaan analog dengan persamaan untuk rangkaian listrik. Model rangkaian magnet dari perilaku magnet sering digunakan dalam desain mesin listrik dan transformator untuk menyederhanakan proses desain yang cukup kompleks.

Dalam rangkaian listrik sederhana seperti yang ditunjukkan Gambar 4.4(a), sumber tegangan  $V$  menggerakkan arus  $I$  di sekitar rangkaian melalui resistansi  $R$ . Hubungan antara besaran-besaran ini diberikan oleh hukum Ohm:

$$V = IR$$

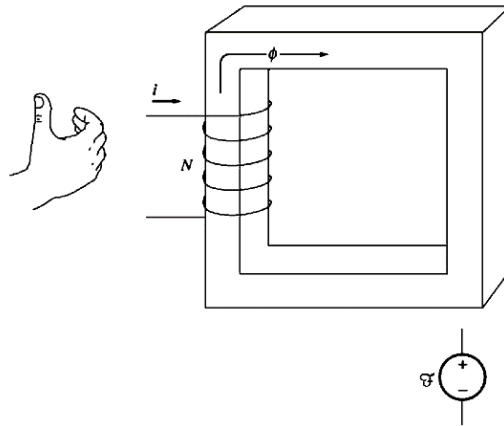
Dalam rangkaian listrik, tegangan atau gaya gerak listriklah yang menggerakkan arus sekarang. Dengan analogi, besaran yang sesuai dalam rangkaian magnet disebut *gaya magnetomotive* ( $mmf$ ). Gaya gerak magnet dari rangkaian magnet sama dengan arus efektif yang diterapkan ke inti, atau

$$\mathcal{F} = Ni \quad (11)$$

dimana  $\mathcal{F}$  adalah simbol gaya gerak magnet, diukur dalam *ampere-turn*.

Seperti sumber tegangan dalam rangkaian listrik, gaya *magnetomotive* dalam rangkaian magnet memiliki polaritas yang terkait dengannya. Ujung positif dari sumber  $mmf$  adalah ujung dari mana fluks keluar, dan ujung negatif dari sumber  $mmf$  adalah ujung di mana fluks masuk kembali. Polaritas  $mmf$  dari gulungan kawat dapat ditentukan dari modifikasi aturan tangan kanan: Jika jari-jari tangan kanan melengkung ke arah arus sekarang dalam gulungan kawat, maka ibu jari akan mengarah ke arah  $mmf$  positif (lihat Gambar 4.5).

Dalam rangkaian listrik, tegangan yang diberikan menyebabkan arus  $I$  mengalir. Demikian pula, dalam rangkaian magnet, gaya gerak magnet yang diterapkan menyebabkan fluks  $\phi$  dihasilkan. Hubungan antara tegangan dan arus dalam rangkaian listrik adalah:



Gambar 4. 5. Menentukan polaritas sumber gaya gerak magnet dalam rangkaian magnet.

Hukum Ohm ( $V = IR$ ); demikian pula, hubungan antara gaya gerak magnet dan fluks adalah

$$\mathcal{F} = \phi \mathcal{R}$$

dimana:

$\mathcal{F}$  = gaya *magnetomotive* (*mmf*) dari rangkaian

$\phi$  = fluks rangkaian

$\mathcal{R}$  = reluktansi rangkaian

#### 4.3.1 Hukum Ampere pada Medan Magnet

Medan magnet adalah mekanisme dasar dimana energi diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya dalam motor, generator dan transformator.

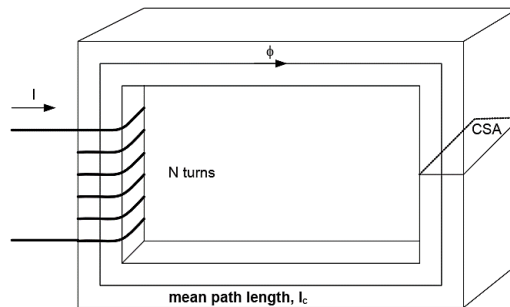
Pertama, kita akan melihat prinsip dasar - **Kawat pembawa arus menghasilkan medan magnet di daerah sekitarnya.**

1. **Hukum Ampere** - hukum dasar yang mengatur penghasil medan magnet oleh arus:

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = I_{net} \quad (12)$$

dimana  $\mathbf{H}$  adalah intensitas medan magnet yang dihasilkan oleh arus  $I_{net}$  dan  $d\mathbf{l}$  adalah elemen diferensial dengan panjang sepanjang jalur integrasi.  $\mathbf{H}$  diukur dalam Ampere-turn per meter.

- Pertimbangkan konduktor pembawa arus yang melilit inti feromagnetik;



Gambar 4. 6. Inti magnet dengan  $N$  lilitan kawat.

- Dengan menerapkan hukum Ampere, jumlah total medan magnet yang diinduksi akan sebanding dengan jumlah arus  $i$  yang mengalir melalui gulungan konduktor dengan  $N$  lilitan di sekitar bahan feromagnetik seperti yang ditunjukkan. Karena inti terbuat dari bahan feromagnetik, diasumsikan bahwa sebagian besar medan magnet akan terbatas pada inti.
- Lintasan integrasi dalam hukum Ampere adalah panjang lintasan rata-rata inti,  $l_c$ . Arus yang lewat dalam jalur integrasi  $I_{net}$  kemudian  $Ni$ , karena kumparan kawat memotong jalur integrasi  $N$  kali sambil membawa arus  $i$ . Karenanya Hukum Ampere menjadi,

$$Hl_c = Ni$$

$$\therefore H = \frac{Ni}{l_c} \quad (13)$$

- Dalam pengertian ini,  $H$  (Ampere-turn per meter) dikenal sebagai upaya yang diperlukan untuk menginduksi medan magnet. Kekuatan fluks medan magnet yang dihasilkan dalam inti juga bergantung pada bahan inti. Jadi,

$$B = \mu H \quad (14)$$

$B$  = kerapatan fluks magnet (*weber*/meter<sup>2</sup>, Tesla (T))

$\mu$  = permeabilitas bahan magnetik (*henri* per meter)

$H$  = intensitas medan magnet (*ampere-turn* per meter)

6. Konstanta  $\mu$  selanjutnya dapat diperluas untuk mencakup permeabilitas relatif yang dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_o} \quad (15)$$

dimana:  $\mu_o$  = permeabilitas ruang hampa (udara)

7. Oleh karena itu **nilai permeabilitas** merupakan kombinasi dari *permeabilitas relatif* dan *permeabilitas ruang bebas*. Nilai permeabilitas relatif tergantung pada jenis bahan yang digunakan. Semakin tinggi jumlah permeabilitas, semakin tinggi jumlah fluks yang diinduksi dalam inti. Permeabilitas relatif adalah cara yang mudah untuk membandingkan daya tarik material.
8. Selain itu, karena permeabilitas besi jauh lebih tinggi daripada udara, sebagian besar fluks dalam inti besi tetap berada di dalam inti alih-alih bergerak melalui udara sekitarnya, yang memiliki permeabilitas lebih rendah. Fluks bocor kecil yang meninggalkan inti besi penting dalam menentukan hubungan fluks antara kumparan dan induktansi sendiri kumparan pada transformator dan motor.
9. Dalam inti seperti pada gambar,

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \frac{\mu N i}{l_c} \quad (16)$$

Sekarang, untuk mengukur fluks total yang mengalir di inti feromagnetik, pertimbangan harus dibuat dalam hal luas penampang melintang. Karena itu,

$$\phi = \int_A \mathbf{B} A \quad (17)$$

dimana:

$A$  = luas penampang melintang inti

Dengan asumsi bahwa kerapatan fluks dalam inti feromagnetik konstan sehingga  $A$  konstan, persamaannya disederhanakan menjadi:

$$\phi = \mathbf{B} A \quad (18)$$

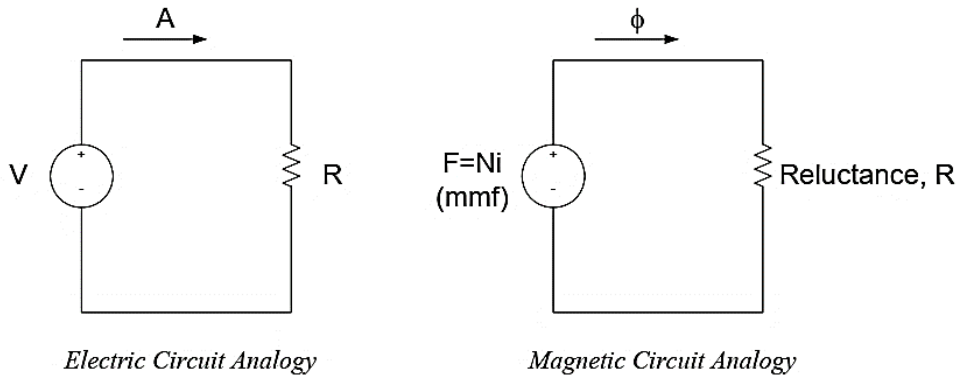
Memperhitungkan berikut diperoleh,

$$\phi = \frac{\mu N i A}{l_c} \quad (19)$$

### 4.3.2 Analogi Rangkaian Magnetik

Aliran fluks magnet yang diinduksi dalam inti feromagnetik dapat dianalogikan dengan rangkaian listrik sehingga dinamakan *rangkaian magnet*.

Analoginya adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 7. Analogi rangkaian listrik dengan rangkaian magnetik.

Mengacu pada analogi rangkaian magnet,  $\mathcal{F}$  dilambangkan sebagai gaya gerak magnet (*mmf*) yang mirip dengan gaya gerak listrik dalam rangkaian listrik (*ggl*). Oleh karena itu, kita dapat dengan aman mengatakan bahwa  $\mathcal{F}$  adalah penggerak utama atau gaya yang mendorong fluks magnet di sekitar inti feromagnetik pada nilai  $Ni$  (mengacu pada hukum ampere).

Oleh karena itu  $\mathcal{F}$  diukur dalam ampere-turn. Oleh karena itu persamaan ekivalen rangkaian magnet adalah seperti yang ditunjukkan:

$$\mathcal{F} = \phi \mathcal{R} \quad (\text{mirip dengan } V = IR) \quad (20)$$

Polaritas *mmf* akan menentukan arah fluks. Untuk dengan mudah menentukan arah fluks, digunakan aturan 'lengkungan tangan kanan':

- a) Arah jari-jari yang melengkung menentukan aliran arus.
- b) Arah ibu jari yang dihasilkan akan menunjukkan aliran fluks magnet.

Unsur  $\mathcal{R}$  dalam analogi rangkaian magnet memiliki konsep yang mirip dengan hambatan listrik. Ini pada dasarnya adalah ukuran ketahanan material terhadap aliran fluks magnet.

**Reluktansi** dalam analogi ini mematuhi aturan hambatan listrik (Aturan Seri dan Paralel Rangkaian). Reluktansi diukur dalam Ampere-turn per weber.

**Reluktansi Seri,**

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_3 + \dots \quad (21)$$

**Reluktansi Paralel,**

$$\frac{1}{\mathcal{R}_{eq}} = \frac{1}{\mathcal{R}_1} + \frac{1}{\mathcal{R}_2} + \frac{1}{\mathcal{R}_3} + \dots \quad (22)$$

Kebalikan dari hambatan/resistansi listrik adalah konduktansi yang merupakan ukuran konduktivitas suatu bahan. Oleh karena itu kebalikan dari reluktansi dikenal sebagai **permeansi**,  $P$ , dimana  $P$  mewakili tingkat di mana material memungkinkan aliran fluks magnet.

$$P = \frac{1}{\mathcal{R}}$$

$$\therefore \text{karena } \phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}, \quad \text{maka } \phi = \mathcal{F}P$$

Juga,

$$\phi = \frac{\mu NiA}{l_c} = NI \frac{\mu A}{l_c} = \mathcal{F} \frac{\mu A}{l_c} \quad (23)$$

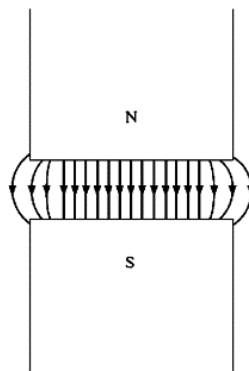
$$\therefore P = \frac{\mu A}{l_c}; \quad \mathcal{R} = \frac{l_c}{\mu A}$$

Dengan menggunakan pendekatan rangkaian magnet, ini menyederhanakan perhitungan yang terkait dengan medan magnet dalam bahan feromagnetik, namun pendekatan ini memiliki ketidakakuratan yang tertanam di dalamnya karena asumsi yang dibuat dalam membuat pendekatan ini (dalam 5% dari jawaban sebenarnya). Kemungkinan alasan ketidakakuratan adalah karena:

- a) Rangkaian magnetik mengasumsikan bahwa semua fluks dibatasi di dalam inti, tetapi pada kenyataannya sebagian kecil fluks keluar dari inti ke udara dengan permeabilitas rendah di sekitarnya, dan fluks ini disebut **fluks bocor**.
- b) Perhitungan reluktansi mengasumsikan panjang jalur rata-rata tertentu dan luas penampang inti. Tidak masalah jika inti hanya berupa satu

blok bahan feromagnetik tanpa sudut, untuk praktisnya inti feromagnetik memiliki sudut pada desainnya, tetapi asumsi ini tidak akurat.

- c) Dalam bahan feromagnetik, permeabilitas bervariasi dengan jumlah fluks yang sudah ada di dalam bahan. **Permeabilitas material tidak konstan** sehingga terdapat ketidaklinieran permeabilitas.
- d) Untuk inti feromagnetik yang memiliki celah udara, terdapat efek **fringing** (mengembang) yang harus diperhitungkan seperti yang ditunjukkan berikut ini.



Gambar 4. 8. Efek *fringing* medan magnet pada celah udara. Perhatikan peningkatan luas penampang dari celah udara dibandingkan dengan luas penampang logam.

### Contoh Soal 1.

Inti feromagnetik ditampilkan berikut ini. Tiga sisi inti ini memiliki lebar seragam, sedangkan sisi keempat agak lebih tipis. Kedalaman inti (ke dalam halaman) adalah 10 cm, dan dimensi lainnya ditunjukkan pada Gambar 4.9. Ada kumparan 200 lilitan yang melilit sisi kiri inti. Dengan asumsi permeabilitas relatif  $\mu_r = 2500$ , berapa banyak fluks yang akan dihasilkan oleh arus masukan 1A?

#### Penyelesaian:

3 sisi inti memiliki  $c_{sa}$  yang sama, sedangkan sisi ke-4 memiliki luas yang berbeda. Dengan demikian inti dapat dibagi menjadi 2 wilayah:

- (1) satu sisi yang lebih tipis
- (2) 3 sisi lainnya disatukan

Rangkaian magnet yang sesuai dengan inti ini:

Panjang jalur rata-rata area I adalah 45 cm, dan luas penampang  $10 \times 10$  cm =  $100 \text{ cm}^2$ .

Karena itu, reluktansi di area pertama adalah

$$\begin{aligned}\mathcal{R}_1 &= \frac{l_1}{\mu A_1} = \frac{l_1}{\mu_r \mu_0 A_1} \\ \mathcal{R}_1 &= \frac{0,45 \text{ m}}{(2500)(4\pi \times 10^{-7})(0,01 \text{ m}^2)} \\ \mathcal{R}_1 &= 14.300 \text{ A} \cdot \text{turn/Wb}\end{aligned}$$

Panjang jalur rata-rata area 2 adalah 130 cm, dan luas penampang adalah  $15 \times 10$  cm =  $150 \text{ cm}^2$ .

Karena itu, reluktansi di area kedua adalah:

$$\begin{aligned}\mathcal{R}_1 &= \frac{l_2}{\mu A_2} = \frac{l_2}{\mu_r \mu_0 A_2} \\ \mathcal{R}_1 &= \frac{1,3 \text{ m}}{(2500)(4\pi \times 10^{-7})(0,015 \text{ m}^2)} \\ \mathcal{R}_1 &= 27.600 \text{ A} \cdot \text{turn/Wb}\end{aligned}$$

Oleh karena itu, reluktansi total dalam inti adalah:

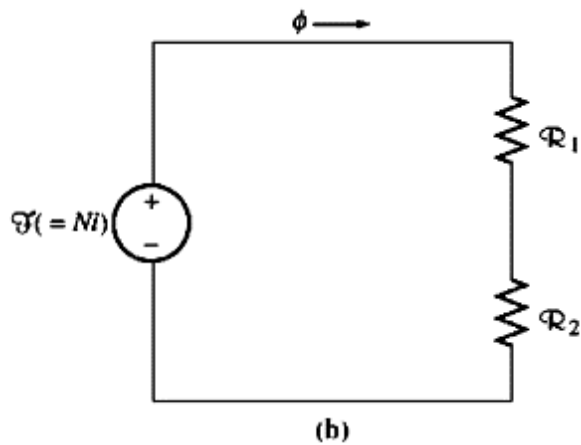
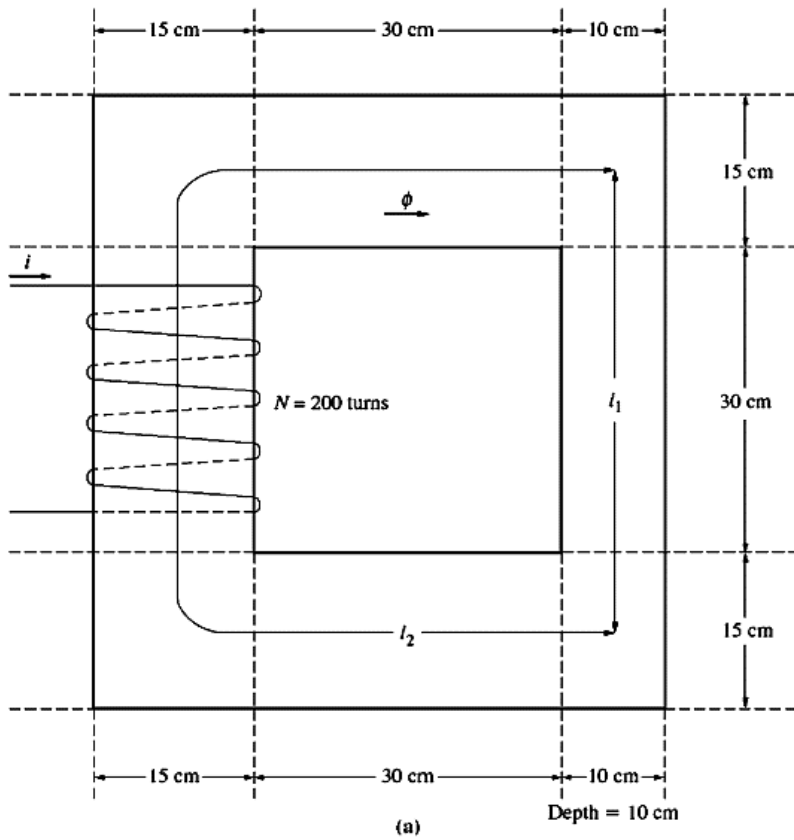
$$\begin{aligned}\mathcal{R}_{eq} &= \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 \\ \mathcal{R}_{eq} &= 14.300 \text{ A} \cdot \frac{\text{turn}}{\text{Wb}} + 27.600 \text{ A} \cdot \text{turn/Wb} \\ \mathcal{R}_{eq} &= 41.900 \text{ A} \cdot \text{turn/Wb}\end{aligned}$$

Gaya gerak magnet total adalah

$$\mathcal{F} = Ni = (200 \text{ turn})(1,0 \text{ A}) = 200 \text{ A} \cdot \text{turn}$$

Fluks total dalam inti diberikan oleh:

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} = \frac{200 \text{ A} \cdot \text{turn}}{41.900 \text{ A} \cdot \text{turn/Wb}} \\ \phi &= 0,0048 \text{ Wb}\end{aligned}$$



Gambar 4. 9. (a) Inti feromagnetik dari soal diatas. (b) Rangkaian magnet yang sesuai dengan (a).

### Contoh Soal 2.

Gambar 4.10 berikut menunjukkan inti feromagnetik yang panjang jalur rata-rata adalah 40 cm. Ada **celah kecil** 0,05 cm dalam struktur inti keseluruhan. Luas penampang inti adalah  $12 \text{ cm}^2$ , permeabilitas relatif inti adalah 4000, dan kumparan kawat pada inti memiliki 400 lilitan.

Asumsikan bahwa *fringing* di celah udara meningkatkan luas penampang efektif celah sebesar 5%. Dengan informasi ini, carilah:

- (a) reluktansi total jalur fluks (besi plus celah udara)
- (b) arus yang dibutuhkan untuk menghasilkan kerapatan fluks 0,5T di celah udara.

### Penyelesaian:

Rangkaian magnet yang sesuai dengan inti ini ditunjukkan Gambar 4.10 di bawah ini. Dimana:  $A_a = 12 + (12 \times 5\%) = 12,6 \text{ cm}^2 = 12,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ .

- (a). Oleh karena itu, total reluktansi jalur fluks adalah:

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_c + \mathcal{R}_{ag} = \frac{l_c}{\mu_r \mu_o A_c} + \frac{l_a}{\mu_o A_a}$$
$$\mathcal{R}_{eq} = \frac{40 \times 10^{-2}}{(4000)(4\pi \times 10^{-7})(12 \times 10^{-4})} + \frac{0,05 \times 10^{-2}}{(4\pi \times 10^{-7})(12,6 \times 10^{-4})}$$
$$\mathcal{R}_{eq} = 66.300 \text{ A} \cdot \frac{\text{turn}}{\text{Wb}} + 316.000 \text{ A} \cdot \text{turn/Wb}$$
$$\mathcal{R}_{eq} = 382.300 \text{ A} \cdot \text{turn/Wb}$$

Perhatikan bahwa celah udara berkontribusi sebagian besar reluktansi meskipun 800 kali lebih pendek dari inti.

- (b) Persamaan berikut,

$$\mathcal{F} = \phi \mathcal{R}$$

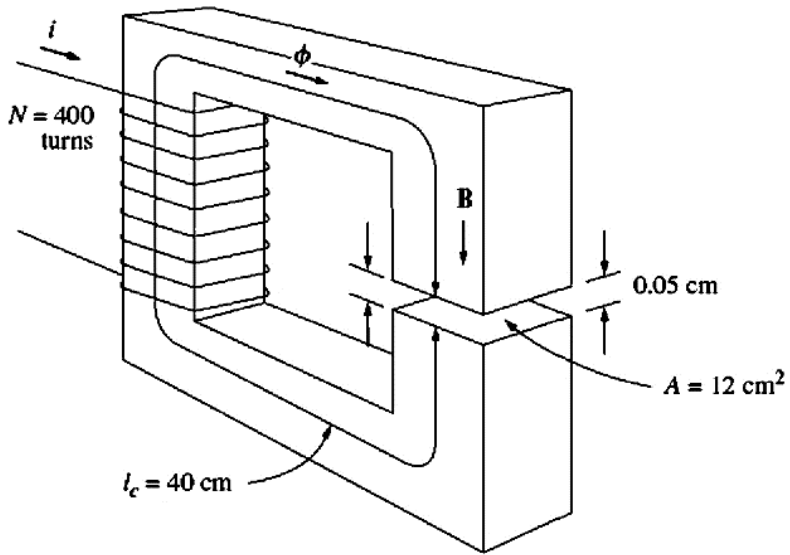
Karena fluks  $\phi = \mathbf{BA}$  dan  $\mathcal{F} = \mathbf{Ni}$ , persamaan tersebut menjadi:

$$\mathbf{Ni} = \mathbf{BA}\mathcal{R}$$

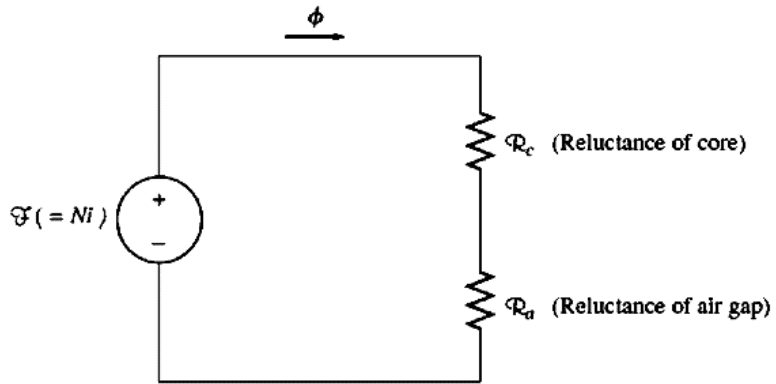
sehingga,

$$i = \frac{\mathbf{BA}\mathcal{R}}{\mathbf{N}} = \frac{(0,5T)(0,00126 \text{ m}^2)(383.200 \text{ A} \cdot \text{turn/Wb})}{400 \text{ turn}}$$
$$i = 0,602 \text{ A}$$

Perhatikan bahwa, karena fluks celah udara diperlukan, luas celah udara efektif digunakan dalam persamaan di atas.



(a)



(b)

Gambar 4. 10. (a) Inti feromagnetik dari contoh diatas. (b) Rangkaian magnet yang sesuai dengan (a).

### Contoh Soal 3.

Gambar 4.11 berikut menunjukkan rotor dan stator yang disederhanakan untuk motor dc. Panjang jalur rata-rata stator adalah 50 cm, dan luas penampangya adalah  $12 \text{ cm}^2$ . Panjang jalur rata-rata dari rotor adalah 5 cm, dan luas penampangya juga dapat diasumsikan  $12 \text{ cm}^2$ . Setiap **celah udara** antara rotor dan stator adalah selebar 0,05 cm, dan luas penampang dari setiap celah udara (termasuk *fringing*) adalah  $14 \text{ cm}^2$ . Besi inti memiliki permeabilitas relatif 2000, dan terdapat 200 lilitan kawat pada inti. Jika arus pada kawat disetel menjadi 1 A, berapa kerapatan fluks yang dihasilkan di celah udara?

#### Penyelesaian:

Untuk menentukan kerapatan fluks di celah udara, pertama-tama perlu dihitung  $mmf$  yang diterapkan pada inti dan reluktansi total jalur fluks. Dengan informasi ini, fluks total dalam inti dapat ditentukan.

Akhirnya, mengetahui luas penampang celah udara memungkinkan kerapatan fluks dihitung. Rangkaian magnetik yang sesuai dengan mesin ini ditunjukkan di bawah ini.

$$\begin{aligned}\mathcal{R}_{eq} &= \mathcal{R}_S + \mathcal{R}_{a1} + \mathcal{R}_r + \mathcal{R}_{a2} = \frac{l_S}{\mu_r \mu_o A_S} + \frac{l_{a1}}{\mu_o A_{a1}} + \frac{l_r}{\mu_r \mu_o A_r} + \frac{l_{a2}}{\mu_o A_{a2}} \\ \mathcal{R}_{eq} &= \frac{50 \times 10^{-2}}{(2000)(4\pi \times 10^{-7})(12 \times 10^{-4})} + \frac{0,05 \times 10^{-2}}{(4\pi \times 10^{-7})(14 \times 10^{-4})} \\ &\quad + \frac{5 \times 10^{-2}}{(2000)(4\pi \times 10^{-7})(12 \times 10^{-4})} + \frac{0,05 \times 10^{-2}}{(4\pi \times 10^{-7})(14 \times 10^{-4})}\end{aligned}$$

$$\mathcal{R}_{eq} = 166.000 + 284.000 + 16.600 + 284.000 \text{ A} \cdot \text{turn/Wb}$$

$$\mathcal{R}_{eq} = 751.000 \text{ A} \cdot \text{turn/Wb}$$

Gaya gerak magnet netto yang diterapkan pada inti adalah

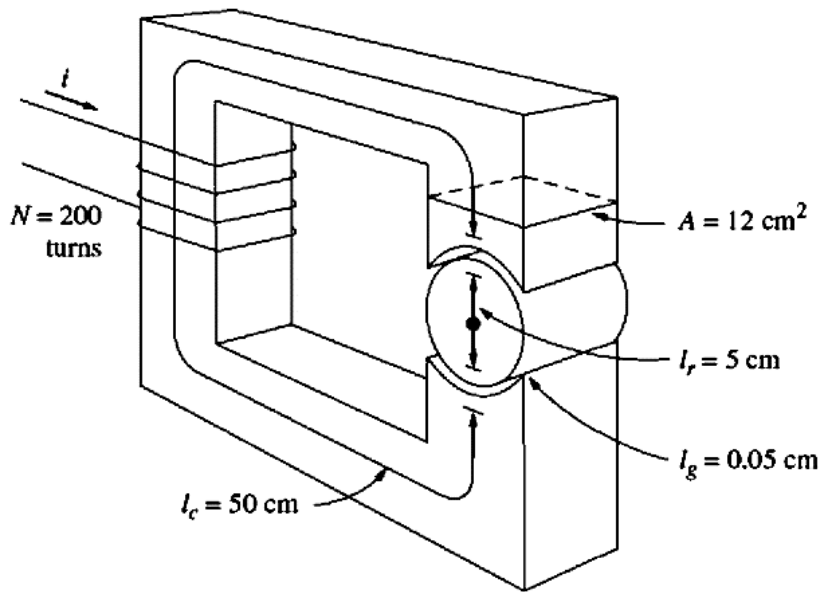
$$\mathcal{F} = Ni = (200 \text{ turn})(1,0 \text{ A}) = 200 \text{ A} \cdot \text{turn}$$

Oleh karena itu, fluks total pada inti adalah

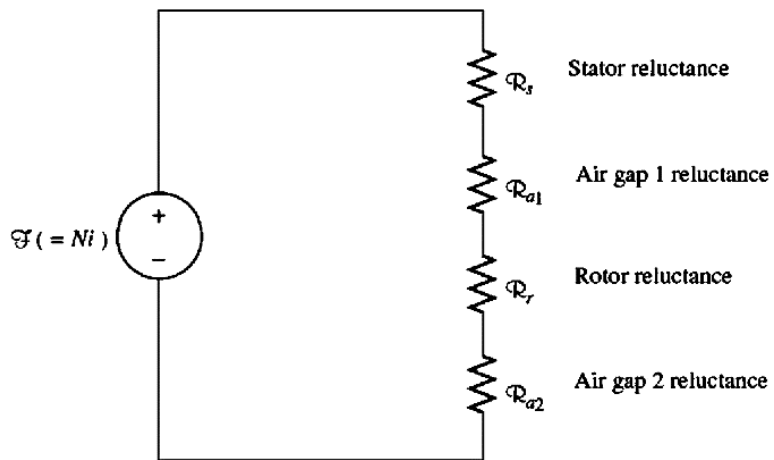
$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} = \frac{200 \text{ A} \cdot \text{turn}}{751.000 \text{ A} \cdot \text{turn/Wb}} = 0,000266 \text{ Wb}$$

Maka, kerapatan fluks magnet di **celah udara** motor, dimana  $A_{ag} = 0,0014 \text{ m}^2$ :

$$B_a = \frac{\phi}{A_a} = \frac{0,000266 \text{ Wb}}{0,0014 \text{ m}^2} = 0,19 \text{ T}$$



(a)



(b)

Gambar 4. 11. (a) Diagram sederhana dari rotor dan stator untuk motor dc.  
 (b) Rangkaian magnet yang sesuai dengan (a).

### 4.3.3 Perilaku Magnetik Bahan Ferromagnetik

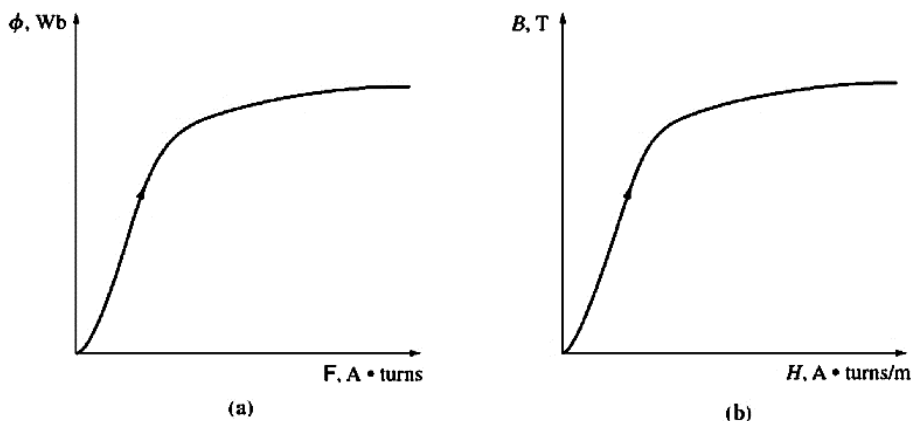
Material yang tergolong nonmagnetik semuanya menunjukkan hubungan linier antara kerapatan fluks  $B$  dan arus kumparan  $I$ . Dengan kata lain, memiliki permeabilitas yang konstan. Jadi, misalnya, di ruang bebas, permeabilitasnya konstan. Tetapi pada besi dan bahan ferromagnetik lainnya *tidak konstan*.

Untuk bahan magnet, nilai  $B$  yang jauh lebih besar diproduksi di bahan ini daripada di ruang bebas. Oleh karena itu, permeabilitas bahan magnet jauh lebih tinggi dari  $\mu_0$ . Namun, permeabilitasnya tidak linier lagi tetapi bergantung pada arus dalam rentang yang luas.

Jadi, **permeabilitas** adalah sifat suatu media yang menentukan karakteristik magnetnya. Dengan kata lain, konsep permeabilitas magnetis sesuai dengan kemampuan material untuk memungkinkan aliran fluks magnet melaluinya.

Dalam mesin listrik dan perangkat elektromekanis, hubungan yang agak linier antara  $B$  dan  $I$  diinginkan, yang biasanya didekati dengan membatasi arus.

Lihatlah kurva magnetisasi dan kurva  $B - H$ . Catatan: Kurva menunjukkan peningkatan aliran arus dc melalui kumparan yang mengelilingi inti ferromagnetik.



Gambar 4. 12. (a) Kurva magnetisasi dc untuk inti ferromagnetik. (b) Kurva magnetisasi dinyatakan dalam kerapatan fluks,  $B$  dan intensitas magnetisasi,  $H$ .

Ketika fluks yang dihasilkan dalam inti diplot versus  $mmf$  yang memproduksinya, plot yang dihasilkan terlihat seperti Gambar 4.12(a). Plot ini disebut **kurva saturasi** atau **kurva magnetisasi**. Peningkatan kecil dalam  $mmf$  menghasilkan peningkatan besar pada fluks yang dihasilkan. Setelah titik tertentu, peningkatan lebih lanjut dalam  $mmf$  menghasilkan peningkatan fluks yang relatif lebih kecil. Terakhir, tidak akan ada perubahan sama sekali saat Anda meningkatkan  $mmf$  lebih jauh. **Wilayah di mana kurva mendatar** disebut **wilayah saturasi**, dan **inti dikatakan jenuh**. **Daerah dimana fluks berubah dengan cepat** disebut **daerah tak jenuh**. Daerah transisi disebut 'lutut' dari kurva.

Dari persamaan  $H = \frac{Ni}{l_c} = \frac{\mathcal{F}}{l_c} = \frac{\phi \mathcal{R}}{l_c}$  dan  $\phi = BA$ , terlihat bahwa intensitas magnet berbanding lurus dengan  $\phi$  berbanding lurus dengan  $mmf$  dan rapat fluks magnet berbanding lurus dengan fluks pada teras tertentu. Kemiringan kurva  $B = \mu H$  adalah permeabilitas inti pada intensitas magnetisasi tersebut. Kurva (b) menunjukkan bahwa permeabilitasnya besar dan relatif konstan di daerah tak jenuh dan kemudian secara bertahap turun ke nilai yang rendah karena inti menjadi sangat jenuh.

Keuntungan menggunakan bahan feromagnetik untuk inti mesin listrik dan transformator adalah bahwa mendapatkan lebih banyak fluks untuk  $mmf$  tertentu daripada dengan udara (ruang bebas).

Jika fluks yang dihasilkan harus proporsional dengan  $mmf$ , maka teras harus **dioperasikan di daerah tak jenuh**.

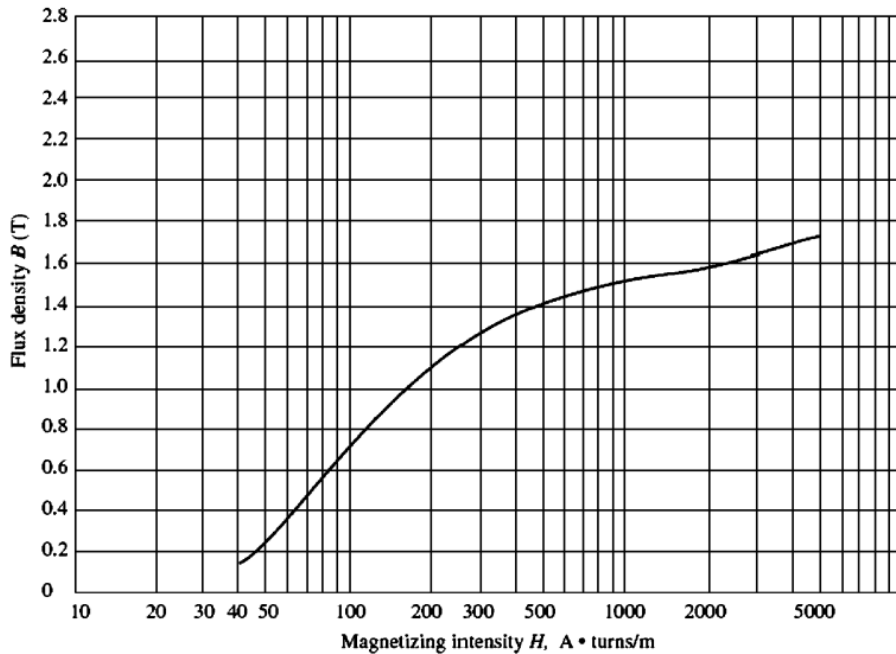
**Generator dan motor bergantung pada fluks magnet** untuk menghasilkan tegangan dan torsi, sehingga membutuhkan fluks sebanyak mungkin. Jadi, generator dan motor **beroperasi di dekat lutut kurva magnetisasi** (fluks tidak terkait secara linier dengan  $mmf$ ). Akibatnya, non-linearitas ini memberikan perilaku yang khas pada mesin.

Saat intensitas magnetisasi  $H$  meningkat, permeabilitas relatif pertama meningkat dan kemudian mulai menurun.

#### Contoh Soal 4.

Inti magnet persegi memiliki panjang lintasan rata-rata 55 cm dan luas penampang 150 cm<sup>2</sup>. Sebuah gulungan kawat 200 lilitan dililitkan di sekitar satu kaki inti. Inti terbuat dari bahan yang memiliki kurva magnetisasi seperti di bawah ini. Tentukan:

- Berapa banyak arus yang dibutuhkan untuk menghasilkan fluks 0,012 Wb di inti?
- Berapakah permeabilitas relatif inti pada tingkat saat ini?
- Berapa nilai reluktansinya?



Gambar 4. 13. Kurva magnetisasi terperinci untuk sepotong baja biasa.

**Penyelesaian:**

(a) Kerapatan fluks yang dibutuhkan dalam inti adalah:

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{0,012 \text{ Wb}}{0,015 \text{ m}^2} = 0,8 \text{ T}$$

Dari Gambar 4.13, intensitas magnetisasi yang dibutuhkan adalah

$$H = 115 \text{ A} \cdot \text{turn/m}$$

Dari persamaan (3), gaya gerak magnet yang diperlukan untuk menghasilkan intensitas magnetisasi ini adalah

$$\mathcal{F} = Ni = Hl_c$$

$$\mathcal{F} = Hl_c = (115 \text{ A} \cdot \text{turn/m})(0,55 \text{ m}) = 63,25 \text{ A} \cdot \text{turn}$$

jadi arus yang dibutuhkan adalah

$$i = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{63,25 \text{ A} \cdot \text{turn}}{200 \text{ turn}} = 0,316 \text{ A}$$

(b) Permeabilitas inti saat ini adalah

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{0,8 T}{115 A \cdot \text{turn/m}} = 0,00696 H/m$$

Oleh karena itu, permeabilitas relatif adalah

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{0,00696 H/m}{4\pi \times 10^{-7} H/m} = 5540$$

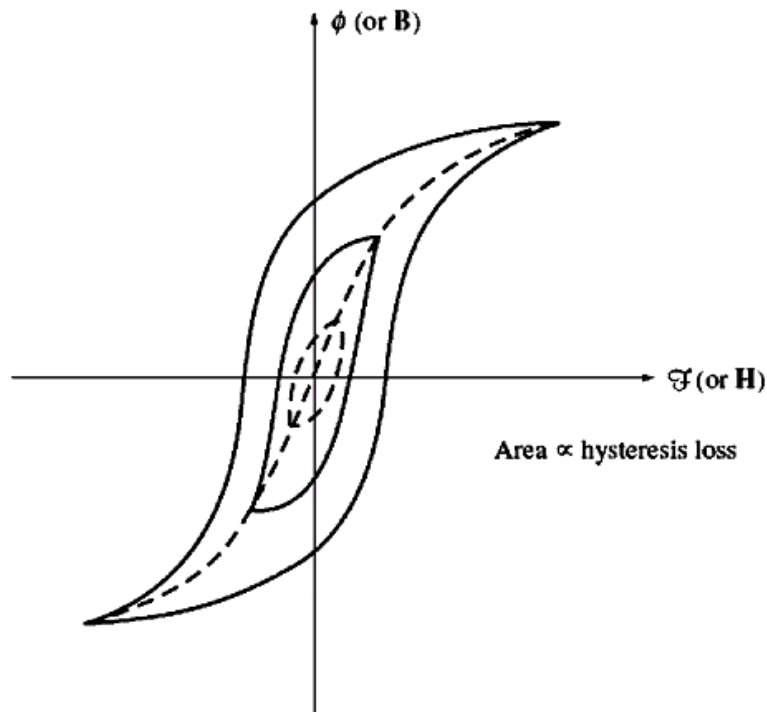
(c) Reluktansi inti adalah

$$\mathcal{R} = \frac{\mathcal{F}}{\phi} = \frac{63,25 A \cdot \text{turn}}{0,012 Wb} = 5270 A \cdot \text{turn/Wb}$$

## 4.4 Hukum Faraday

### 4.4.1 Tegangan Induksi Medan Magnet yang Berubah Setiap Saat

Sebelumnya, kita lihat menghasilkan medan magnet dan sifat-sifatnya. Sekarang, kita akan melihat berbagai cara di mana medan magnet yang ada dapat mempengaruhi lingkungannya.



Gambar 4. 14. Pengaruh ukuran ekskursi gaya gerak otomotif terhadap besarnya kerugian histeresis.

#### 4.4.2 Hukum Faraday

'Jika fluks melewati belokan kumparan kawat, tegangan akan diinduksi pada lilitan kawat yang berbanding lurus dengan laju perubahan fluks terhadap waktu'

$$e_{\text{ind}} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (24)$$

Jika ada  $N$  jumlah lilitan pada kumparan dengan jumlah fluks yang sama yang mengalir melaluinya, maka:

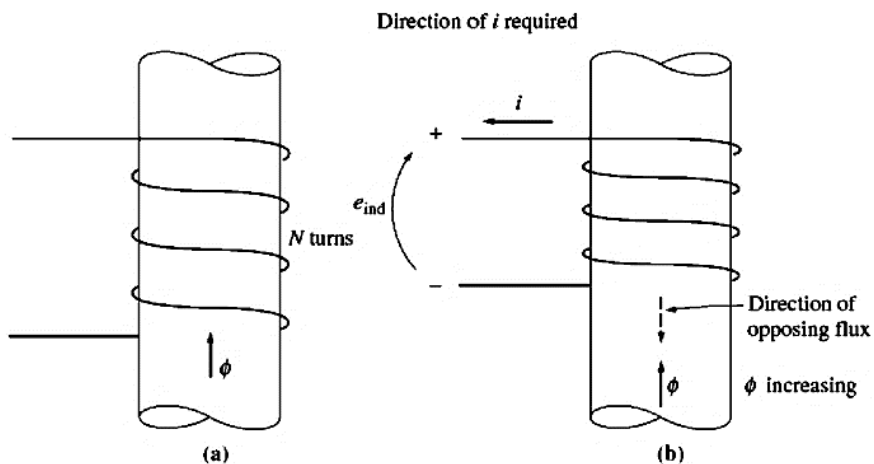
$$e_{\text{ind}} = -N\frac{d\phi}{dt} \quad (25)$$

dimana:  $N$  = jumlah lilitan kawat dalam kumparan.

Perhatikan tanda negatif pada persamaan di atas yang sesuai dengan **Hukum Lenz** yang menyatakan:

'Arah tegangan timbul dalam kumparan adalah sedemikian rupa sehingga jika kumparan dihubung pendek, itu akan menghasilkan arus yang akan menyebabkan fluks berlawanan dengan perubahan fluks asli.'

Perhatikan gambar di bawah ini:



Gambar 4. 15. Arti dari **hukum Lenz**: (a) Sebuah kumparan yang menutupi fluks magnet yang meningkat: (b) Menentukan polaritas tegangan yang dihasilkan.

- Jika kekuatan fluks yang ditunjukkan meningkat, maka tegangan yang dibangun di dalam kumparan akan cenderung membentuk fluks yang akan melawan naiknya fluks tersebut.
- Arus yang mengalir seperti yang ditunjukkan pada gambar akan menghasilkan fluks yang berlawanan dengan kenaikan.
- Jadi, tegangan pada kumparan harus dibangun dengan polaritas yang dibutuhkan untuk menggerakkan arus melalui rangkaian eksternal. Jadi,  $-e_{ind}$
- **Catatan:** Dalam buku karangan *Chapman*, tanda minus sering diabaikan karena polaritas tegangan yang dihasilkan dapat ditentukan dari pertimbangan fisik.

2. Persamaan  $e_{ind} = d\phi/dt$  mengasumsikan bahwa fluks yang persis sama ada di setiap putaran kumparan. Ini tidak benar, karena ada fluks bocor. Persamaan ini akan memberikan jawaban yang valid jika belitan dikopel erat, sehingga sebagian besar fluks yang melewati satu putaran kumparan memang melewati semuanya.
3. Sekarang pertimbangkan tegangan induksi pada putaran ke- $i$  kumparan

$$e_i = \frac{d\phi_i}{dt}$$

Karena ada  $N$  jumlah lilitan,

$$e_{ind} = \sum_{i=1}^N e_i = \sum_{i=1}^N \frac{d\phi_i}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \sum_{i=1}^N \phi_i \right) \quad (26)$$

Persamaan di atas dapat ditulis ulang menjadi,

$$e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (27)$$

dimana  $\lambda$  (hubungan fluks) didefinisikan sebagai:

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \phi_i \quad (\text{weber-turns}) \quad (28)$$

4. **Hukum Faraday adalah sifat dasar medan magnet yang terlibat dalam operasi transformator.**
5. **Hukum Lenz pada transformator digunakan untuk memprediksi polaritas tegangan yang diinduksi pada belitan transformator.**

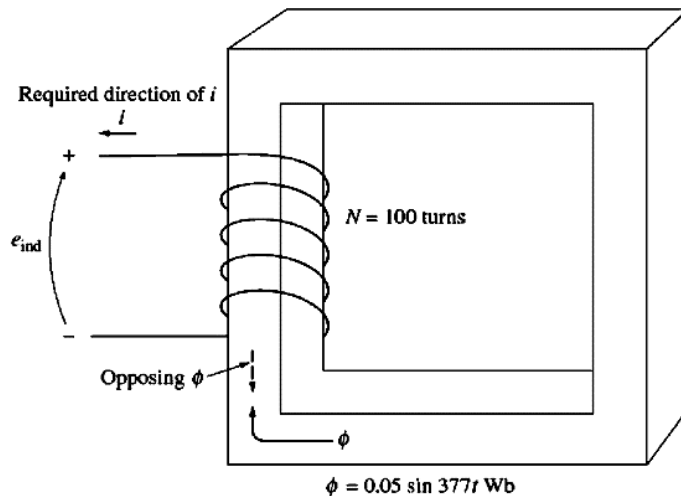
### Contoh Soal 5.

Gambar 4.16 menunjukkan gulungan kawat yang melilit inti besi. Jika fluks dalam inti ditentukan oleh persamaan:

$$\phi = 0,05 \sin 377t \text{ Wb}$$

Jika ada 100 lilitan pada inti, berapakah tegangan yang dihasilkan pada terminal kumparan?

Dari polaritas apa tegangan selama saat fluks meningkat ke arah referensi yang ditunjukkan pada Gambar 4.16? Asumsikan bahwa semua fluks magnet tetap berada di dalam inti (asumsikan bahwa kebocoran fluks adalah nol).



Gambar 4. 16. Penentuan polaritas tegangan terminal pada inti magnet.

### Penyelesaian:

Dengan alasan yang sama seperti pada pembahasan sebelumnya, arah tegangan saat fluks meningkat pada arah referensi harus positif ke negatif, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16. Besarnya tegangan yang diberikan oleh

$$e_{ind} = N \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_{ind} = (100 \text{ turn}) \frac{d}{dt} (0,05 \sin 377t)$$

$$e_{ind} = 1885 \cos 377t$$

atau sebagai alternatif,

$$e_{ind} = 1885 \sin(377t + 90^\circ) \text{ volt}$$

#### 4.4.3 Sumber Gaya Induksi pada Kawat

1. Konduktor pembawa arus yang ada dalam medan magnet seragam dengan kerapatan fluks  $\mathbf{B}$ , akan menghasilkan gaya ke konduktor  $\mathbf{l}$  kawat. Bergantung pada arah medan magnet di sekitarnya, gaya yang diinduksi diberikan oleh

$$\mathbf{F} = i (\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad (29)$$

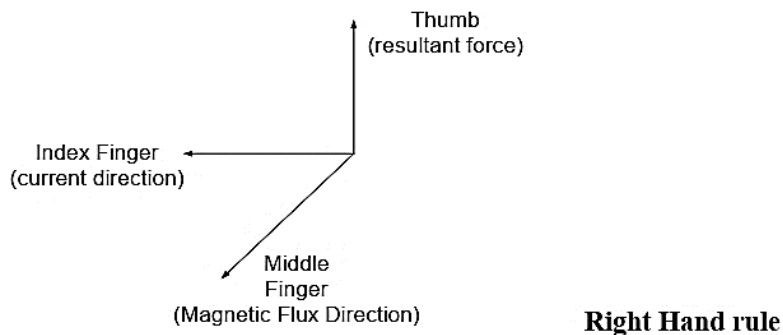
dimana:

$i$  = mewakili aliran arus di konduktor

$\mathbf{l}$  = panjang kawat, dengan arah  $\mathbf{l}$  ditentukan searah aliran arus

$\mathbf{B}$  = kerapatan medan magnet

2. Arah gaya ditentukan oleh aturan tangan kanan. Arah gaya tergantung pada arah aliran arus dan arah medan magnet di sekitarnya. Aturan praktis untuk menentukan arah dapat ditemukan dengan menggunakan aturan tangan kanan seperti yang ditunjukkan Gambar 4.17.



Gambar 4. 17. Aturan tangan kanan.

3. Rumus gaya induksi yang ditunjukkan sebelumnya adalah benar jika konduktor pembawa arus tegak lurus dengan arah medan magnet. Jika konduktor pembawa arus diposisikan pada sudut medan magnet, rumusnya diubah menjadi sebagai berikut:

$$\mathbf{F} = i\mathbf{L} \sin \theta \quad (30)$$

dimana:

$\theta$  = sudut antara konduktor dan arah medan magnet.

4. Singkatnya, fenomena ini merupakan dasar dari sebuah motor listrik dimana torsi atau gaya putar dari motor tersebut merupakan pengaruh dari arus medan stator dan medan magnet dari rotor.

#### 4.4.4 Tegangan Induksi pada Konduktor yang Bergerak dalam Medan Magnet

1. Jika konduktor bergerak atau 'memotong' melalui medan magnet, tegangan akan diinduksi antara terminal konduktor di mana besarnya tegangan yang diinduksi tergantung pada kecepatan kawat dengan asumsi bahwa medan magnet konstan. Ini dapat diringkas dalam bentuk formulasi seperti yang ditunjukkan:

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) l \quad (31)$$

dimana:

$\mathbf{v}$  – kecepatan kawat konduktor

$\mathbf{B}$  – kerapatan medan magnetik

$l$  – panjang kawat konduktor dalam medan magnetik

2. Catatan: Nilai  $l$  (panjang) tergantung pada sudut dimana kawat memotong medan magnet. Maka rumus yang lebih lengkap adalah sebagai berikut:

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) l \cos \theta \quad (32)$$

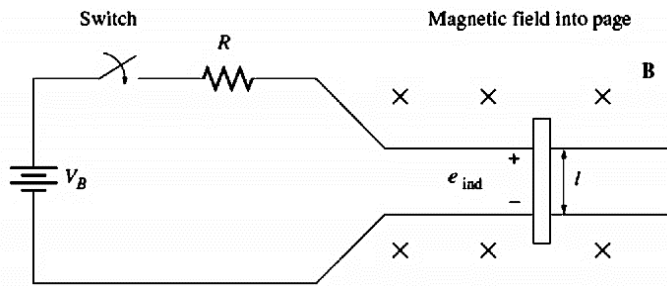
dimana:

$\theta$  - sudut antara konduktor dan arah  $(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$

3. Induksi tegangan pada kawat yang bergerak dalam medan magnet sangat penting untuk pengoperasian semua jenis generator.

#### 4.4.5 Mesin DC Linear

Mesin dc linear adalah bentuk paling sederhana dari mesin dc yang mudah dipahami dan beroperasi sesuai dengan prinsip yang sama serta menunjukkan perilaku yang sama seperti motor dan generator. Pertimbangkan hal berikut ini.



Gambar 4. 18. Mesin dc linier, dimana medan magnet mengarah ke dalam halaman.

Persamaan yang diperlukan untuk memahami mesin dc linier adalah sebagai berikut:

Menghasilkan gaya pada konduktor pembawa arus:

$$\mathbf{F} = i (\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad (33)$$

Tegangan yang diinduksi pada konduktor pembawa arus yang bergerak dalam medan magnet:

$$\mathbf{e}_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) l \quad (34)$$

Hukum tegangan Kirchhoff:

$$V_B - iR - e_{ind} = 0 \quad (35)$$

$$\therefore V_B = e_{ind} + iR = 0 \quad (36)$$

Hukum Newton untuk gerak:

$$\mathbf{F}_{net} = m\mathbf{a} \quad (37)$$

#### 4.4.6 Hukum Faraday tentang Induksi Elektromagnetik

Faraday meringkas fakta di atas menjadi dua hukum yang dikenal sebagai Hukum Induksi Elektromagnetik Faraday.

##### 4.4.6.1 Hukum Pertama

Menyatakan:

**Kapanpun fluks magnet yang dihubungkan dengan rangkaian berubah, e.m.f. selalu diinduksi di dalamnya.**

atau

**Kapanpun konduktor memotong fluks magnet, sebuah e.m.f. diinduksi di konduktor itu.**

#### 4.4.6.2 Hukum Kedua

Menyatakan:

**Besarnya e.m.f. sama dengan tingkat perubahan fluks yang terlingkupi.**

#### Penjelasan:

Misalkan sebuah kumparan memiliki  $N$  belokan dan fluks yang melaluinya berubah dari nilai awal  $\Phi_1$  webers menjadi nilai akhir  $\Phi_2$  webers dalam waktu  $t$  detik. Kemudian, mengingat bahwa dengan hubungan-fluks berarti hasil kali dari jumlah lilitan dan fluks yang terlingkup dengan kumparan, kita memiliki:

Fluks lingkup awal =  $N\Phi_1$ , tambahkan fluks lingkup akhir =  $N\Phi_2$

$$\therefore \text{ emf induksi } e = \frac{N\Phi_2 - N\Phi_1}{t} \frac{\text{Wb}}{\text{detik}} \text{ atau volt}$$

atau,

$$e = N \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t} \text{ volt}$$

Menempatkan pernyataan di atas dalam bentuk diferensial, kita dapatkan

$$e = \frac{d}{dt} (N\Phi) = N \frac{d\Phi}{dt} \text{ volt}$$

Biasanya, tanda minus diberikan pada ekspresi ruas kanan untuk menandakan fakta bahwa induksi e.m.f. mengatur arus sedemikian rupa sehingga efek magnet yang dihasilkan olehnya berlawanan dengan penyebab yang memproduksinya

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \text{ volt} \quad (38)$$

#### Contoh Soal 6.

Gulungan medan dari generator dc 6 kutub masing-masing memiliki 500 lilitan, dihubungkan secara seri. Saat medan tereksitasi, terjadi fluks magnet sebesar 0,02 Wb/kutub. Jika rangkaian medan dibuka dalam 0,02 detik dan magnet sisa adalah 0,002 Wb/kutub, hitung tegangan rata-rata yang diinduksi melintasi terminal medan. Ke arah mana tegangan ini diarahkan relatif terhadap arah arus.

#### Penyelesaian:

Total jumlah lilitan,  $N = 6 \times 500 = 3000$

Total fluks awal =  $6 \times 0.02 = 0.12 \text{ Wb}$

Total fluks sisa =  $6 \times 0.002 = 0.012 \text{ Wb}$

Perubahan fluks,  $d\Phi = 0.12 - 0.012 = 0.108 \text{ Wb}$

Waktu terbukanya rangkaian,  $dt = 0.02 \text{ second}$

$$\therefore \text{ emf induksi} = N \frac{d\Phi}{dt} = 3000 \times \frac{0,108}{0,02} = 16.200 \text{ volt}$$

Arah dari e.m.f. sama dengan arah awal arus penguatan.

### Contoh Soal 7.

Sebuah kumparan resistansi  $100 \Omega$  ditempatkan dalam medan magnet  $1 \text{ mWb}$ . Kumparan memiliki 100 lilitan dan galvanometer dengan resistansi  $400 \Omega$  dihubungkan secara seri dengannya. Temukan rata-rata e.m.f. dan arus jika kumparan dipindahkan dalam  $1/10$  detik dari medan yang diberikan ke bidang  $0,2 \text{ mWb}$ .

### Penyelesaian:

$$\text{e.m.f. induksi} = N \frac{d\Phi}{dt} \text{ volt}$$

Maka,  $d\Phi = 1 - 0.2 = 0.8 \text{ mWb} = 0.8 \times 10^{-3} \text{ Wb}$

$$dt = 1/10 = 0.1 \text{ detik}; N = 100$$

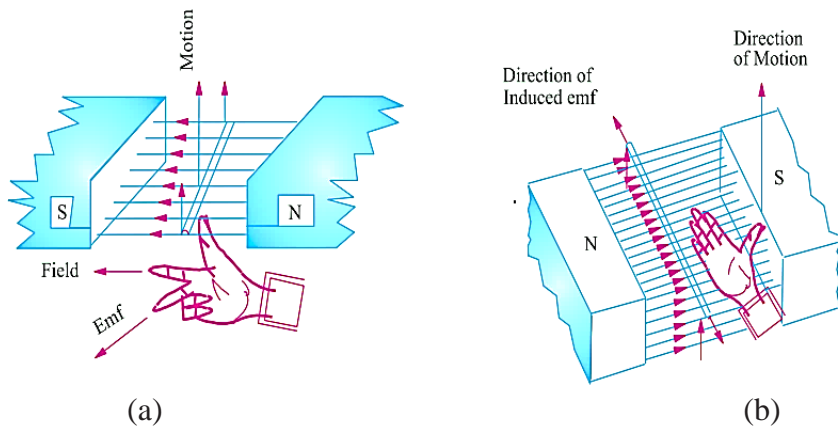
$$e = 100 \times 0.8 \times 10^{-3} / 0.1 = \mathbf{0.8 \text{ V}}$$

Total resistansi rangkaian =  $100 + 400 = 500 \Omega$

Arus induksi =  $0.8/500 = 1.6 \times 10^{-3} \text{ A} = \mathbf{1.6 \text{ mA}}$

### 4.4.6.3 Arah induksi *EMF* dan arus

Terdapat hubungan yang pasti antara arah arus induksi, arah fluks dan arah gerak konduktor. Arah arus induksi dapat ditemukan dengan mudah dengan menerapkan Aturan Tangan Kanan Fleming atau Aturan Tangan Kanan Datar atau **Hukum Lenz**. **Aturan Fleming** (Gambar 4.19) digunakan di mana induksi e.m.f. disebabkan oleh fluks yang memotong (yaitu, e.m.f. yang diinduksi secara dinamis) dan **hukum Lenz** ketika digunakan untuk mengubah oleh fluks gandeng (yaitu, e.m.f. yang diinduksi secara statis).



Gambar 4. 19. (a) Aturan Tangan Kanan Fleming; dan (b) Aturan tangan kanan datar.

Gambar 4.19(b) menunjukkan cara lain untuk menentukan arah e.m.f yang diinduksi, dikenal sebagai aturan Tangan Kanan Datar. Di sini, sisi depan tangan dipegang tegak lurus terhadap fluks yang datang, dengan ibu jari menunjuk ke arah gerakan konduktor. Arah jari menunjukkan arah ggl yang diinduksikan.

#### 4.4.7 Hukum Lenz

Arah arus induksi juga dapat ditemukan oleh hukum ini yang dirumuskan oleh **Lenz** pada tahun 1835. Hukum ini menyatakan, pada dasarnya, arus yang diinduksi secara elektromagnetik selalu mengalir ke arah yang sedemikian rupa sehingga aksi medan magnet yang dibentuk olehnya cenderung untuk menentang penyebab yang menghasilkannya.

Pernyataan ini diperjelas dengan mengacu pada Gambar 4.1(a) dan Gambar 4.1(b). Diketahui bahwa ketika kutub  $U$  magnet batang mendekati kumparan, arus induksi yang dibentuk oleh induksi e.m.f. mengalir berlawanan arah jarum jam di koil seperti yang terlihat dari sisi magnet. Hasilnya adalah permukaan kumparan menjadi kutub  $U$  sehingga cenderung menentang pendekatan kutub  $U$  magnet ke depan (seperti kutub-kutub yang saling tolak). Energi mekanik yang digunakan untuk mengatasi gaya tolak ini diubah menjadi energi listrik yang muncul di kumparan.

Ketika magnet ditarik seperti pada Gambar 4.1(b), arus induksi mengalir searah jarum jam sehingga membuat permukaan kumparan (menghadap magnet) menjadi kutub  $S$ . Oleh karena itu, kutub  $U$  magnet

harus ditarik melawan gaya tarik kutub  $S$  dari kumparan. Sekali lagi, energi mekanik yang dibutuhkan untuk mengatasi gaya tarik-menarik ini diubah menjadi energi listrik.

Dapat dibuktikan bahwa **hukum Lenz** adalah konsekuensi langsung dari Hukum Kekekalan Energi. Bayangkan sejenak bahwa ketika kutub  $U$  magnet (Gambar 4.1(a)) mendekati kumparan, arus yang diinduksi mengalir sedemikian rupa sehingga membuat kumparan menghadapi kutub  $S$ . Kemudian, karena tarikan yang melekat antara kutub yang berbeda, magnet akan secara otomatis ditarik ke arah kumparan tanpa mengeluarkan energi mekanik.

Artinya, kita akan mampu menciptakan energi listrik dari ketiadaan, yang disangkal oleh Hukum Kekekalan Energi yang tidak dapat diganggu gugat. Sebenarnya, menurut aturan hukum ini, **arus induksi harus mengalir sedemikian rupa sehingga efek magnetis yang dihasilkannya cenderung melawanan penyebab yang memproduksi arus tersebut.**

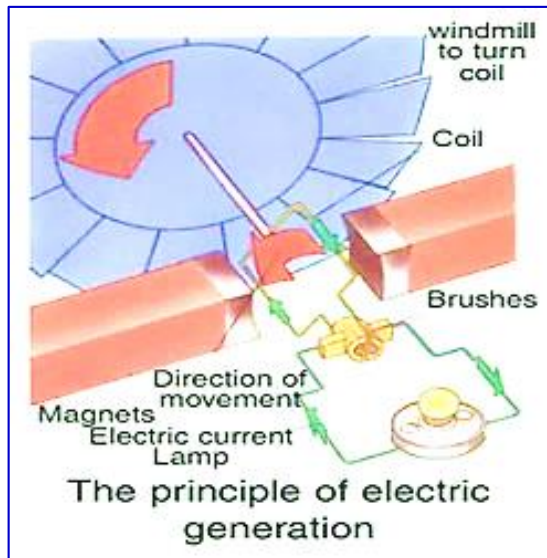
Dalam kasus ini, gerakan relatif magnet dengan magnet terhadap kumparan yang merupakan penyebab timbulnya arus induksi. Oleh karena itu, **arus yang diinduksi selalu mengalir ke arah yang berlawanan dengan gerakan relatif ini** yaitu, mendekati atau menarik magnet.

#### **4.4.8 EMF Induksi**

**EMF** induksi bisa berupa:

- (i) Induksi secara dinamis** atau
- (ii) Induksi statis.**

Dalam kasus pertama, biasanya bidang tersebut tidak bergerak dan konduktor memotongnya (seperti pada generator dc). Tetapi dalam kasus kedua, biasanya konduktor atau kumparan tetap diam dan fluks yang terhubung dengannya diubah dengan hanya menambah atau mengurangi arus yang menghasilkan fluks ini (seperti pada transformator).



Gambar 4. 20. Prinsip pembangkitan listrik.

#### 4.4.9 EMF yang diinduksi secara dinamis

Pada Gambar 4.21, konduktor  $A$  ditunjukkan dalam penampang melintang, terletak  $m^2$  dalam medan magnet seragam dengan kerapatan fluks  $B$  Wb/m<sup>2</sup>. Panah yang ditempelkan ke  $A$  menunjukkan arah gerakannya. Pertimbangkan kondisi yang ditunjukkan pada Gambar 4.21(a) ketika  $A$  memotong pada sudut siku-siku fluks.

Misalkan ' $l$ ' adalah panjangnya dalam bidang dan biarkan bergerak dalam jarak  $dx$  dalam waktu  $dt$ . Maka luas yang disapu itu adalah  $= ldx$ . Karenanya, pemotongan fluks  $= ldx \times B$  weber.

Perubahan fluks  $= Bl dx$  weber

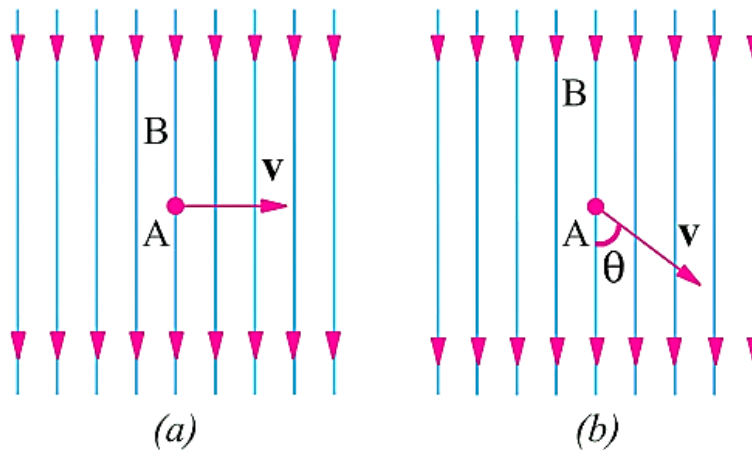
Waktu yang diperlukan  $= dt$  second

Oleh karena itu, menurut **Hukum Faraday**, E.m.f. diinduksi di dalamnya (dikenal sebagai e.m.f. yang diinduksikan secara dinamis) adalah tingkat perubahan fluks lingkup:

$$= \frac{Bl dx}{dt} = Bl \frac{dx}{dt} = Blv \quad \text{volt} \quad (39)$$

dimana:

$$\frac{dx}{dt} = \text{kecepatan}$$



Gambar 4. 21. Konduktor *A* berada dalam medan magnet seragam.

Jika konduktor *A* bergerak pada sudut  $\theta$  dengan arah fluks [Gambar 4.21(b)] maka e.m.f. induksi adalah  $e = Blv \sin \theta$  volt =  $l(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$  (yaitu sebagai vektor produk silang  $\mathbf{v}$  dan  $\mathbf{B}$ ).

Arah induksi e.m.f. diberikan oleh Aturan Tangan Kanan Fleming atau Aturan Tangan Kanan Datar dan paling mudah dengan perkalian vektor yang diberikan di atas.

Perlu dicatat bahwa generator bekerja pada produksi e.m.f yang diinduksi secara dinamis. di konduktor yang bertempat di angker berputar yang terletak dalam medan magnet yang kuat.

### Contoh Soal 8.

Konduktor dengan panjang 1meter bergerak pada sudut siku-siku menuju medan magnet seragam dengan kerapatan fluks  $1,5 \text{ Wb/m}^2$  dengan kecepatan 50 meter/detik. Hitung e.m.f. diinduksi di dalamnya. Tentukan juga nilai induksi e.m.f. saat konduktor bergerak pada sudut  $30^\circ$  ke arah medan.

### Penyelesaian:

Diketahui,  $B = 1.5 \text{ Wb/m}^2$ ;  $l = 1 \text{ m}$ ;  $v = 50 \text{ m/s}$ ;  $e = ?$

Maka,  $e = Blv = 1.5 \times 1 \times 50 = 75 \text{ V}$ .

Dalam kasus kedua  $\theta = 30^\circ$

$\therefore \sin 30^\circ = 0.5$

$\therefore e = 75 \times 0.5 = 37.5 \text{ V}$

### Contoh Soal 9.

Sebuah kumparan persegi dari sisi 10 cm dan dengan 100 lilitan diputar dengan kecepatan seragam 500 rpm sekitar sumbu pada sudut siku-siku terhadap bidang magnetik seragam  $0,5 \text{ Wb/m}^2$ . Hitunglah nilai sesaat dari e.m.f. induksi ketika bidang kumparan berada:

- (i) pada sudut sejajar bidang magnetik tersebut.
- (ii) pada sudut siku-siku terhadap bidang medan magnetik.
- (iii) pada sudut  $45^\circ$  terhadap arah medan magnetik.

### Penyelesaian:

$EMF$  yang diinduksi dalam kumparan akan menjadi nol ketika bidangnya berada pada sudut kanan ke bidang bidang, meskipun akan memiliki fluks maksimum yang terkait dengannya. Namun, kumparan akan memiliki emf maksimum diinduksi di dalamnya ketika bidangnya terletak sejajar dengan bidang bidang meskipun akan memiliki fluks minimum yang terkait dengannya.

Secara umum, nilai e.m.f. diberikan oleh  $e = \omega N \Phi_m \sin \theta = E_m \sin \theta$  dimana  $\theta$  adalah sudut antara sumbu nol e.m.f. dan bidang kumparan.

Maka,

$$f = 500/60 = 25/3 \text{ r.p.s} ; N = 100 ;$$

$$B = 0.5 \text{ Wb/m}^2 ; A = (10 \times 10) \times 10^{-4} = 10^{-2} \text{ m}^2.$$

$$\therefore E_m = 2 \pi f N B A = 2 \pi (25/3) \times 100 \times 0.5 \times 10^{-2} = 26.2 \text{ V}$$

$$(i) \text{ karena } \theta = 0 ; \sin \theta = 0 ; \text{ sehingga, } e = 0.$$

$$(ii) \text{ Maka, } \theta = 90^\circ ; e = E_m \sin 90^\circ = 26.2 \times 1 = 26.2 \text{ V}$$

$$(iii) \sin 45^\circ = 1/2 ; e = 26.2 \times 1/2 = \mathbf{13.1 \text{ V}}$$

### Contoh Soal 10.

Sebuah batang konduktor  $AB$  (Gambar 4.22) membuat kontak dengan rel logam  $AD$  dan  $BC$  yang berjarak 50 cm dalam medan magnet seragam  $B = 1,0 \text{ Wb/m}^2$  tegak lurus terhadap bidang  $ABCD$ . Resistansi total (konstanta diasumsikan) dari rangkaian  $ABCD$  adalah  $0,4 \Omega$ .

- (a) Berapakah arah dan besar e.m.f. induksi magnet ketika dipindahkan ke kiri dengan kecepatan 8 m/detik?
- (b) Gaya apa yang dibutuhkan untuk menjaga batang konduktor tetap

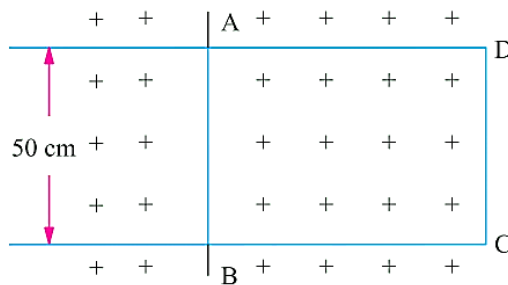
bergerak?

- (c) Bandingkan laju di mana pekerjaan mekanis dilakukan oleh gaya  $F$  dengan laju perkembangan daya listrik dalam rangkaian.

**Penyelesaian:**

- (a) Karena  $AB$  bergerak ke kiri, arah arus induksi, seperti yang ditemukan dengan menerapkan aturan *Tangan Kanan Fleming* adalah dari  $A$  ke  $B$ . Besarnya e.m.f yang tereduksi diberikan oleh  $e = \beta l v$  volt =  $1 \times 0.5 \times 8 = 4$  volt
- (b) Arus melalui  $AB = 4/0.4 = 10$  A, gaya pada  $AB$  adalah  $F = BIl = 1 \times 10 \times 0.5 = 5$  N.  
Arah gaya ini, seperti yang ditemukan dengan menerapkan aturan tangan kiri Fleming, adalah ke kanan.
- (c) Laju perubahan kerja mekanis =  $F \times v = 5 \times 8 = 40$  J/s or W  
Daya listrik yang dihasilkan =  $e i = 4 \times 10 = 40$  W

Dari penjelasan di atas, terlihat jelas bahwa kerja mekanik yang dilakukan dalam menggerakkan konduktor melawan gaya  $F$  diubah menjadi energi listrik.



Gambar 4. 22. Sebuah batang konduktor  $AB$  kontak dengan rel logam  $AD$  dan  $BC$  dalam medan magnet seragam yang tegak lurus terhadap bidang  $ABCD$ .

**Contoh Soal 11.**

Dalam dinamo 4 kutub, fluks/kutub adalah 15 mWb. Hitung rata-rata e.m.f. induksi di salah satu konduktor angker, jika angker digerakkan pada 600 r.p.m.

**Penyelesaian:**

Perlu dicatat bahwa setiap kali konduktor lewat di bawah kutub (apakah N

atau S) konduktor memotong fluks 15 mWb. Oleh karena itu, pemotongan fluks dalam satu putaran adalah  $15 \times 4 = 60$  mWb. Karena konduktor berputar pada  $600/60 = 10$  r.p.s., waktu untuk 1 revolusi adalah  $1/10 = 0.1$  detik.

Maka,

$$\text{emf yang dibangkitkan rata - rata} = N \frac{d\Phi}{dt} \text{ volt}$$

$$N = 1; d\Phi = 60 \text{ mWb} = 6 \times 10^{-2} \text{ Wb}; dt = 0.1 \text{ detik}$$

$$e = 1 \times 6 \times 10^{-2}/0.1 = \mathbf{0.6 \text{ V}}$$

#### 4.4.10 EMF Induksi Statis

Dibagi lagi menjadi dua yaitu:

##### (a) EMF Induksi Bersama

Pertimbangkan dua kumparan A dan B yang saling berdekatan (lihat Gambar 4.23). Kumparan A bergabung dengan baterai, sakelar dan resistansi variabel R sedangkan kumparan B dihubungkan ke voltmeter sensitif **V**. Ketika arus melalui A dibuat dengan menutup sakelar, medan magnetnya diatur yang sebagian terhubung dengan atau dilewati kumparan B. Saat arus melalui A diubah, fluks yang dihubungkan dengan B juga berubah. Oleh karena itu, e.m.f. yang diproduksi dalam B yang besarnya ditentukan oleh **Hukum Faraday** dan arahnya ditentukan oleh **Hukum Lenz**.

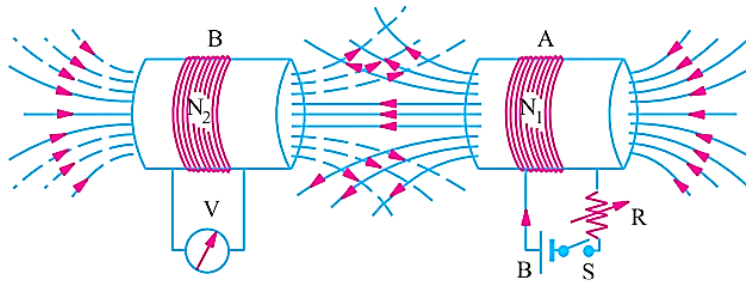
Jika, sekarang, baterai dihubungkan ke B dan voltmeter melintasi A (Gambar 4.24), maka situasinya terbalik dan sekarang perubahan arus di B akan menghasilkan e.m.f yang diinduksi bersama.

Jelas bahwa dalam contoh yang dipertimbangkan di atas, tidak ada pergerakan konduktor apapun, variasi fluks disebabkan oleh variasi kekuatan arus saja. EMF ini yang diinduksikan dalam satu kumparan oleh pengaruh kumparan lainnya disebut **e.m.f. induksi bersama** (secara statis).

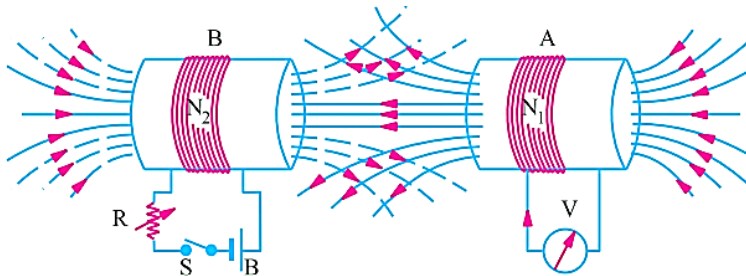
##### (b) EMF induksi diri

Ini adalah e.m.f. diinduksikan dalam kumparan karena perubahan fluksnya sendiri yang terkait dengannya. Jika arus yang melalui kumparan (lihat Gambar 4.25) diubah, maka fluks yang terhubung dengan lilitannya sendiri juga akan berubah, yang akan menghasilkan

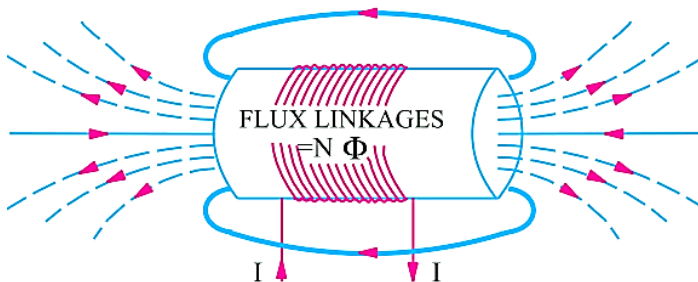
di dalamnya apa yang disebut **e.m.f induksi sendiri**. Arah dari e.m.f. (seperti yang diberikan oleh hukum Lenz) akan seperti menentang setiap perubahan aliran yang, pada kenyataannya, penyebab utama produksinya. Oleh karena itu, ini juga dikenal sebagai **e.m.f. lawan** atau **e.m.f. induksi diri**.



Gambar 4. 23. Dua kumparan A dan B yang saling berdekatan, kumparan A dihubungkan ke baterai, saklar S, dan resistor variabel R.



Gambar 4. 24. Baterai dihubungkan ke B dan voltmeter melintasi A.



Gambar 4. 25. EMF induksi diri timbul karena arus mengalir dalam kumparan berubah, sehingga fluks yang timbul juga akan berubah.

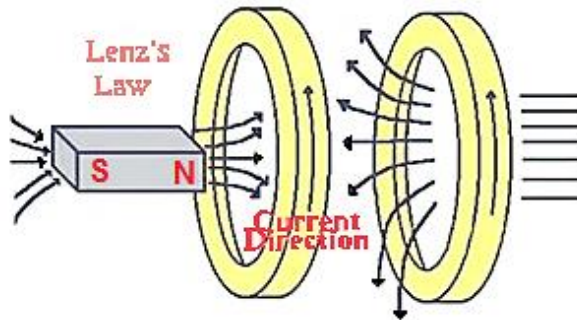
### Contoh Soal 12.

Sebuah kumparan 1000 putaran dililitkan pada inti magnet toroidal yang memiliki reluktansi  $10^6$  AT/Wb. Ketika arus kumparan adalah 5 A dan meningkat pada kecepatan 200 A/detik, tentukan.

(a) Hitunglah:

- (i) energi yang disimpan dalam rangkaian magnet
- (ii) tegangan diterapkan melintasi kumparan. Diasumsikan resistansi kumparan nol.

(b) Bagaimana jika resistansi kumparan adalah  $2 \Omega$ .



Gambar 4. 26. Arah arus berlawanan (hukum Lenz) akan seperti menentang setiap perubahan aliran fluks, yang penyebab utama timbulnya fluks.

### Penyelesaian:

(a)  $L = N^2/\mathcal{R} = 1000^2/10^6 = 1 \text{ H}$

(i) Energi yang tersimpan  $= \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \times 1 \times 5^2 = 12.5 \text{ J}$

(ii) Tegangan yang diterapkan melintasi kumparan = e.m.f induksi diri dalam koil  $= L \cdot di/dt = 1 \times 200 = 200 \text{ V}$

(b) Meskipun akan ada kehilangan energi tambahan sebesar  $5^2 \times 2 = 50$  W di atas resistansi kumparan, energi yang disimpan dalam kumparan akan tetap sama. Namun, tegangan kumparan akan meningkat dengan jumlah  $= 5 \times 2 = 10 \text{ V}$  yaitu, sekarang nilainya menjadi 210 V.

### 4.5 Soal Latihan

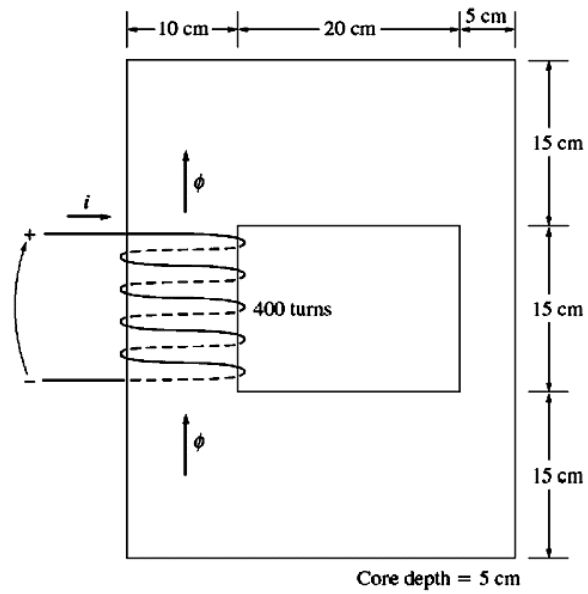
1. Konduktor dengan panjang aktif 30 cm membawa arus 100 A dan terletak pada sudut siku-siku ke medan magnet dengan kekuatan 0,4

$\text{Wb/m}^2$ . Hitung gaya dalam newton yang diberikan padanya. Jika gaya menyebabkan konduktor bergerak dengan kecepatan 10 m/detik, hitunglah:

- a. e.m.f. diinduksi di dalamnya dan
- b. daya dalam watt yang dikembangkan olehnya.

[Jawaban: 12 N; 1.2 V, 120 W].

2. Kabel horizontal lurus membawa arus stabil 150 A dan terletak di medan magnet seragam  $0,6 \text{ Wb/m}^2$  yang bergerak vertikal ke bawah. Tentukan besarnya gaya dalam kg/meter panjang konduktor dan arah kerjanya. [Jawaban: 9.175 kg/m secara horizontal].
3. Sebuah konduktor, panjangnya 10 cm, bergerak dengan kecepatan seragam 2 m/detik pada sudut siku-siku ke dirinya sendiri dan ke medan magnet seragam yang memiliki kerapatan fluks  $1 \text{ Wb/m}^2$ . Hitung e.m.f. yang diinduksi di antara ujung konduktor. [Jawaban: 0.2 V].
4. Sebuah choke inti besi dirancang untuk memiliki induktansi 20 H ketika beroperasi pada kerapatan fluks  $1 \text{ Wb/m}^2$ , permeabilitas relatif inti besi yang sesuai adalah 4000. Tentukan jumlah lilitan pada belitan, mengingat bahwa fluks magnet lintasan memiliki panjang rata-rata 22 cm pada inti besi dan 1 mm pada celah udara yang penampangannya adalah  $10 \text{ cm}^2$ . Abaikan kebocoran dan fringing. [Jawaban: 4100]
5. Inti feromagnetik ditunjukkan pada Gambar 4.27. Kedalaman inti adalah 5 cm. Dimensi inti lainnya seperti yang ditunjukkan pada gambar. Carilah nilai arus yang akan menghasilkan fluks sebesar 0,005 Wb. Dengan arus ini, berapakah kerapatan fluks di bagian atas inti? Berapa kerapatan fluks di sisi kanan inti? Asumsikan bahwa permeabilitas relatif inti adalah 1000.



Gambar 4. 27. Inti feromagnetik dengan kedalaman inti 5 cm.

# BAB 5

## TRANSFORMATOR DAN KONSTRUKSI

### 5.1 Pendahuluan

Transformator pada umumnya banyak digunakan untuk sistem tenaga listrik maupun untuk rangkaian elektronik.

Dalam sistem tenaga listrik, transformator digunakan untuk memindahkan energi dari satu rangkaian listrik ke rangkaian listrik berikutnya tanpa mengubah frekuensi. Transformator dapat menaikkan atau menurunkan tegangan maupun arus, sehingga memungkinkan transmisi tegangan ekstra tinggi. Penggunaan transformator pada sistem tenaga dapat dibagi:

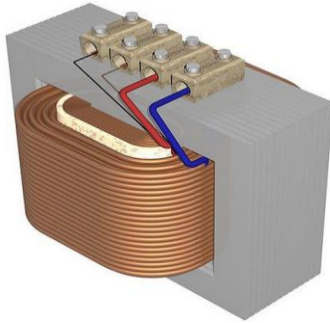
- a. Transformator penaik tegangan (*step up*) atau disebut trafo daya, untuk menaikkan tegangan pembangkitan menjadi tegangan transmisi.
- b. Transformator penurun tegangan (*step down*), dapat disebut trafo distribusi, untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi.
- c. Transformator instrumen, untuk pengukuran yang terdiri dari trafo tegangan dan trafo arus, dipakai untuk menurunkan tegangan dan arus agar dapat masuk ke meter-meter pengukuran.

Transformator pada sistem tenaga listrik untuk kapasitas besar dapat dihubungkan 3 fasa dan untuk kapasitas kecil dapat dihubungkan 1 fasa.

Dalam rangkaian elektronik, transformator digunakan sebagai gandengan impedans antara sumber dan beban, memisahkan satu rangkaian dari rangkaian yang lain, dapat menghambat arus searah sambil melalukan arus bolak-balik dengan daya yang cukup kecil.

### 5.2 Pengertian Transformator

*“Transformator adalah suatu alat yang memindahkan tenaga listrik antar dua rangkaian listrik atau lebih melalui induksi elektromagnetik.”*



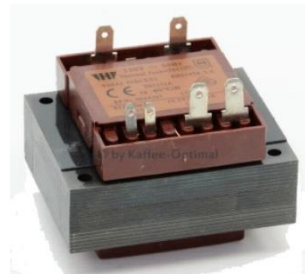
Gambar 5. 1.  
Transformator.

Transformator merupakan peralatan mesin listrik statis yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik sehingga dapat memindahkan energi dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain tanpa merubah frekuensi. Penggunaan yang sangat sederhana dan andal itu merupakan salah satu sebab penting bahwa arus bolak-balik sangat banyak dipergunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik.

Transformator atau sering disebut dengan istilah **Trafo** adalah suatu alat listrik yang dapat mengubah taraf suatu tegangan AC ke taraf yang lain. Maksud dari perubahan taraf tersebut diantaranya seperti untuk menurunkan Tegangan AC dari 220VAC ke 12 VAC ataupun menaikkan Tegangan dari 110VAC ke 220 VAC. Transformator atau Trafo ini bekerja mengikuti prinsip Induksi Elektromagnet dan hanya dapat bekerja pada tegangan yang berarus bolak balik (AC).Trafo memegang peranan yang sangat penting untuk pendistribusian tenaga listrik. Trafo menaikkan listrik yang berasal dari pembangkit listrik oleh PLN hingga ratusan kilo Volt untuk di distribusikan, dan kemudian Trafo lainnya menurunkan tegangan listrik tersebut ke tegangan yang diperlukan untuk setiap rumah tangga maupun perkantoran yang pada umumnya menggunakan tegangan AC 220 volt.

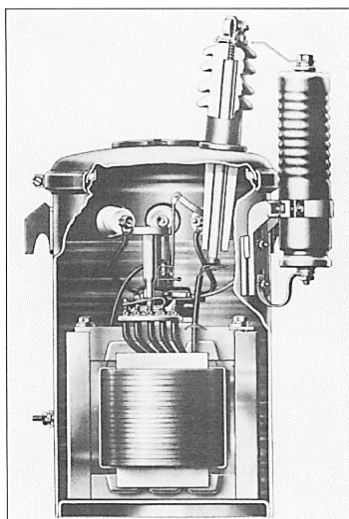


(a)



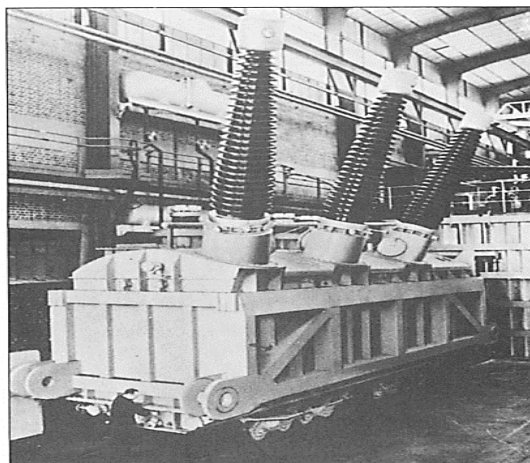
(b)

Gambar 5. 2. Transformator: (a). 3 fasa dan (b). 1 fasa.



Gambar 5. 3. Tampak potongan dari transformator distribusi tipe proteksi-diri dengan ukuran 2 sampai 25 kVA, 7200:240/120 V.

Hanya diperlukan satu insulator tegangan tinggi dan arrester surja-petir karena sisi dengan tegangan *line* 7200-V dan sisi primer ditanahkan (*grounded*). (Sumber: *General Electric Company*).



Gambar 5. 4. Transformator 3 fasa 660-MVA 50-Hz digunakan sebagai penaik tegangan generator dari 20 kV menjadi tegangan transmisi 405 kV. (Sumber: *CEM Le Havre, French Member of the Brown Boveri Corporation*).

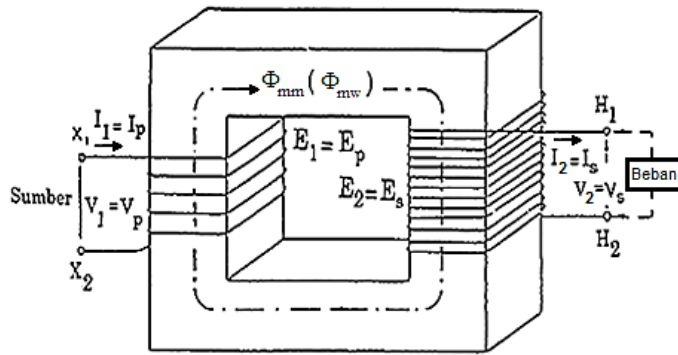
Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik bolak-balik dari satu level ke level tegangan yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Pada umumnya transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis, dan dua buah kumparan primer, dan kumparan sekunder. Rasio perubahan tegangan akan tergantung dari rasio jumlah lilitan pada dua kumparan itu. Biasanya kumparan terbuat dari kawat tembaga yang di belit seputar “kaki” inti transformator.

Transformator digunakan secara luas baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Pengguna transformator dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya, kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya jarak jauh. Pengguna transformator yang sangat sederhana dan andal, merupakan salah satu alasan penting dalam pemakaiannya dalam penyaluran tenaga listrik arus bolak-balik, karena arus bolak-balik sangat banyak dipergunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik.

Pada penyaluran tenaga listrik arus bolak-balik terjadi kerugian energi sebesar  $I^2R$  watt. Kerugian ini akan banyak berkurang apabila tegangan dinaikkan setinggi mungkin. Dengan demikian saluran-saluran transmisi tenaga listrik senantiasa mempergunakan tegangan yang tinggi. Hal ini dilakukan terutama untuk mengurangi kerugian tenaga listrik yang terjadi, dengan cara mempergunakan transformator untuk menaikkan tegangan listrik dipusat listrik dari tegangan generator yang biasanya berkisaran antara 6kV sampai 20kV pada awal transmisi ketegangan saluran transmisi antara 100kV sampai 1000kV, kemudian menurunkannya lagi pada ujung akhir saluran ke tegangan yang lebih rendah.

Pada Gambar 5.5, sisi belitan  $X_1X_2$  adalah sisi tegangan rendah dan sisi belitan  $H_1H_2$  adalah sisi tegangan tinggi.

Bila salah satu sisi, baik sisi tegangan tinggi (TT), maupun sisi tegangan rendah (TR) dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka sisi tersebut, disebut dengan **sisi primer**, sedangkan sisi lain yang dihubungkan dengan beban disebut **sisi sekunder**.

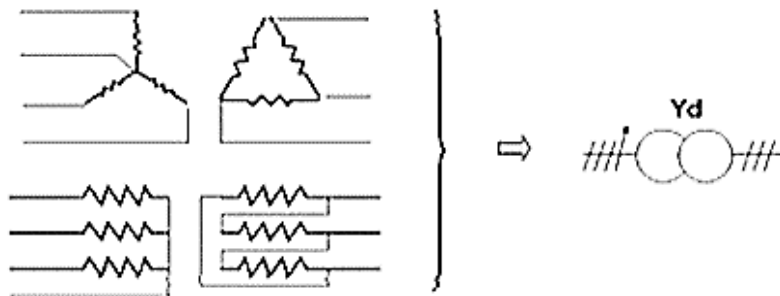


Gambar 5. 5. Transformator ideal.

### 5.2.1 Simbol Transformator



Gambar 5. 6. Simbol transformator 1 fasa.



Gambar 5. 7. Simbol transformator 3 fasa.

## 5.3 Jenis-Jenis Transformator

### 5.3.1 Transformator *step-up*

Transformator *step-up* adalah transformator yang memiliki lilitan sekunder lebih banyak daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penaik tegangan. Transformator ini biasa ditemui pada pembangkit tenaga listrik sebagai penaik tegangan yang dihasilkan generator menjadi tegangan tinggi yang digunakan dalam transmisi jarak jauh.



Gambar 5. 8. Lambang transformator *step-up*.

### 5.3.2 Transformator *step-down*

Transformator *step-down* memiliki lilitan sekunder lebih sedikit daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penurun tegangan. Transformator jenis ini sangat mudah ditemui, terutama dalam adaptor ac-dc.



Gambar 5. 9. Skema transformator *step-down*.

### 5.3.3 Auto Transformator

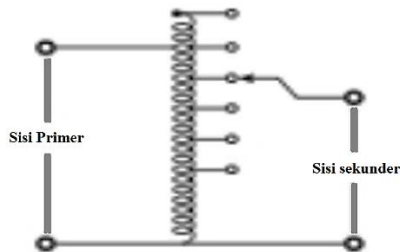
Transformator jenis ini hanya terdiri dari satu lilitan yang berlanjut secara listrik, dengan sadapan tengah. Dalam transformator ini, sebagian lilitan primer juga merupakan lilitan sekunder. Fasa arus dalam lilitan sekunder selalu berlawanan dengan arus primer, sehingga untuk tarif daya yang sama lilitan sekunder bisa dibuat dengan kawat yang lebih tipis dibandingkan transformator biasa. Keuntungan dari autotransformator adalah ukuran fisiknya yang kecil dan kerugian yang lebih rendah daripada jenis dua lilitan. Tetapi transformator jenis ini tidak dapat memberikan isolasi secara listrik antara lilitan primer dengan lilitan sekunder. Selain itu, auto transformator tidak dapat digunakan sebagai penaik tegangan lebih dari beberapa kali lipat (biasanya tidak lebih dari 1,5 kali).



Gambar 5. 10. Skema auto transformator.

### 5.3.4 Auto Transformator Variabel

Auto transformator variabel sebenarnya adalah autotransformator biasa yang sadapan tengahnya bisa diubah-ubah, memberikan perbandingan lilitan primer-sekunder yang berubah-ubah.



Gambar 5. 11. Skema autotransformator variabel.

### 5.3.5 Transformator isolasi

Transformator isolasi memiliki lilitan sekunder yang berjumlah sama dengan lilitan primer, sehingga tegangan sekunder sama dengan tegangan primer. Tetapi pada beberapa desain, gulungan sekunder dibuat sedikit lebih banyak untuk mengkompensasi kerugian. Transformator seperti ini berfungsi sebagai isolasi antara dua kalang. Untuk penerapan audio, transformator jenis ini telah banyak digantikan oleh kopling kapasitor.

### 5.3.6 Transformator pulsa

Transformator pulsa adalah transformator yang didesain khusus untuk memberikan keluaran gelombang pulsa. Transformator jenis ini menggunakan material inti yang cepat jenuh sehingga setelah arus primer mencapai titik tertentu, fluks magnet berhenti berubah. Karena GGL induksi pada lilitan sekunder hanya terbentuk jika terjadi perubahan fluks magnet, transformator hanya memberikan keluaran saat inti tidak jenuh, yaitu saat arus pada lilitan primer berbalik arah.

## 5.4 Konstruksi Transformator

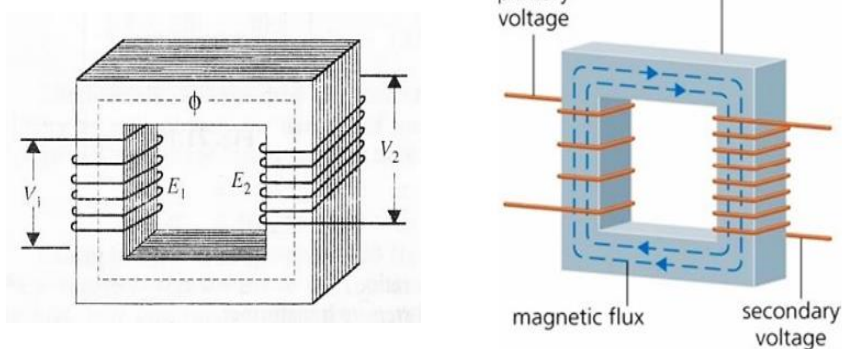
Pada umumnya konstruksi transformator daya terdiri atas bagian-bagian sebagai berikut:

1. Inti (core) yang dilaminasi, yang terbuat dari lembaran-lembaran plat besi lunak atau baja silikon yang diklem jadi satu.
2. Dua buah kumparan, kumparan primer dan sekunder.
3. Tangki.
4. Sistem pendinginan, pada transformator dengan daya yang cukup besar.
5. Terminal.
6. Bushing, untuk menghubungkan rangkaian dalam transformator dengan rangkaian luar.

Secara umum transformator dapat dibedakan dua jenis menurut konstruksinya, yaitu:

### 5.4.1 Tipe inti

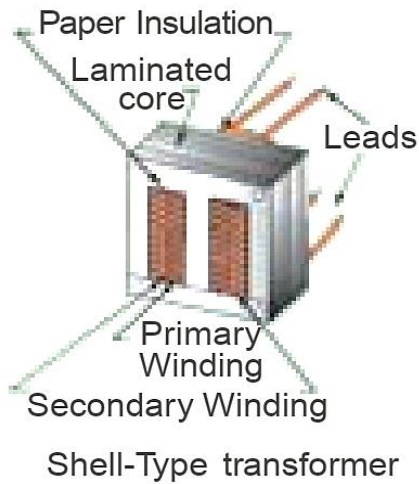
Pada transformator tipe inti, kumparan mengelilingi inti dan konstruksi dari intinya berbentuk huruf **L** atau huruf **U**.



Gambar 5. 12. Konstruksi transformator tipe inti.

### 5.4.2 Tipe cangkang

Pada transformator tipe cangkang, kumparan atau belitan transformator dikelilingi oleh inti dan konstruksi intinya berbentuk huruf **E**, huruf **I**, dan huruf **F**.



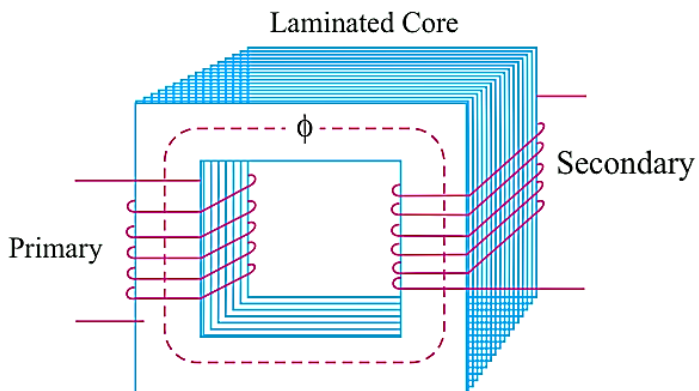
Gambar 5. 13. Konstruksi transformator tipe cangkang.

Bagian-bagian transformator dibagi menjadi 2 bagian yaitu:

### 5.4.3 Bagian utama Transformator

#### 5.4.3.1 Inti Transformator

Inti Transformator berfungsi untuk mengalirkan fluks yang timbul akibat adanya induksi arus bolak-balik pada kumparan yang mengelilingi inti sehingga kumparan yang lainnya akan terinduksi. Untuk mengurangi losses pada inti transformator maka inti transformator dibuat dari lempengan besi tipis yang berisolasi. Gambar 5.14 memperlihatkan inti transformator.

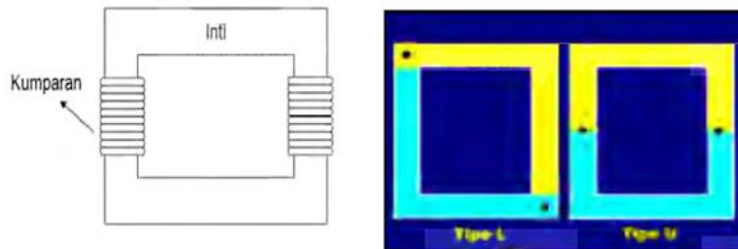


Gambar 5. 14. Inti transformator.

Inti transformator terdiri dari 2 jenis yaitu :

**a. Tipe inti**

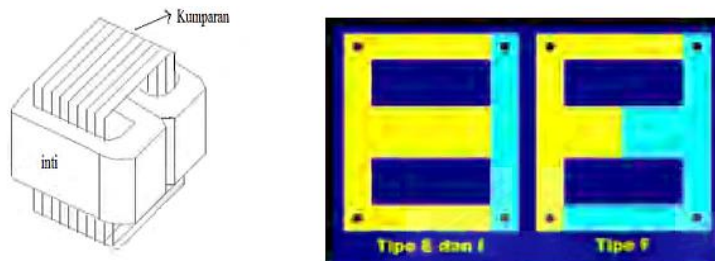
Pada transformator tipe inti, kumparan mengelilingi inti dan konstruksi dari intinya berbentuk huruf L atau huruf U yang dapat dilihat pada Gambar 5.15.



Gambar 5. 15. Inti transformator tipe inti.

**b. Tipe cangkang**

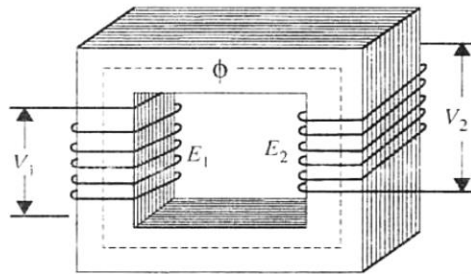
Pada transformator ini, kumparan atau belitan transformator dikelilingi oleh inti dan konstruksi intinya berbentuk huruf **E**, **I**, dan **F**. Inti transformator tipe cangkang dapat dilihat pada Gambar 5.16.



Gambar 5. 16. Inti transformator tipe cangkang.

**5.4.3.2 Kumparan**

Kumparan transformator terbuat dari lilitan kawat yang diberi isolasi sehingga membentuk suatu gulungan. Kumparan pada transformator terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder seperti yang pada Gambar 5.17.



Gambar 5. 17. Kumparan transformator.

### 5.4.3.3 Tangki dan Konservator Transformator

Tangki pada Transformator digunakan untuk menyimpan minyak transformator dan melindungi bagian-bagian transformator yang direndam dalam minyak. Pada tangki dibuat bersirip-sirip yang berguna sebagai bagian dari sistem pendinginan eksternal transformator. Pada proses pendinginan terjadi pertukaran panas antara tangki transformator yang bersuhu tinggi dengan sirip-sirip yang melepas panas karena adanya aliran udara.

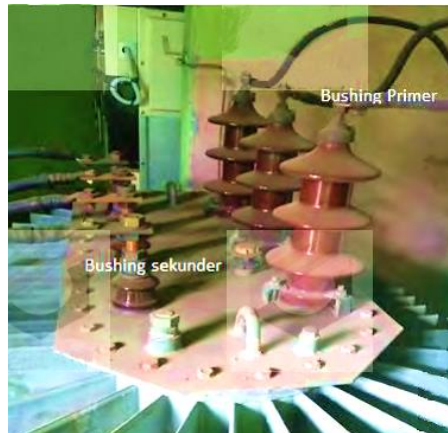
Salah satu bagian dari transformator adalah konservator yang ditempatkan di dalam tangki dan terendam minyak, digunakan untuk menampung pemuai minyak transformator. Tangki transformator dapat dilihat pada Gambar 5.18.



Gambar 5. 18. Tangki transformator.

#### 5.4.3.4 Bushing

Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator yang dijadikan sebagai sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar dan sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan badan utama tanki transformator. Bushing dapat dibagi menjadi empat bagian utama yaitu isolasi, konduktor, klem koneksi dan aksesoris. Bushing transformator dapat dilihat pada Gambar 5.19.



Gambar 5. 19. Bushing transformator.

#### 5.4.3.5 Dielectric (Minyak Isolasi Transformator dan Isolasi Kertas)

Dalam hal ini, *dielectric* dibagi menjadi :

##### a. Minyak Isolasi Transformator

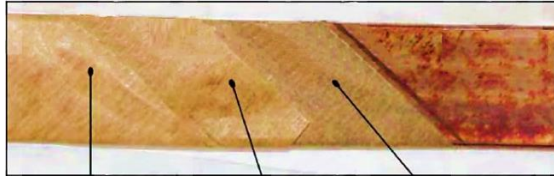
Minyak isolasi digunakan sebagai media isolasi, pendingin dan pelindung belitan transformator. Minyak isolasi harus memiliki kemampuan untuk menahan tegangan tembus dan dapat meredam panas sehingga minyak isolasi dapat melindungi transformator dari gangguan. Minyak transformator dapat dilihat pada Gambar 5.20.



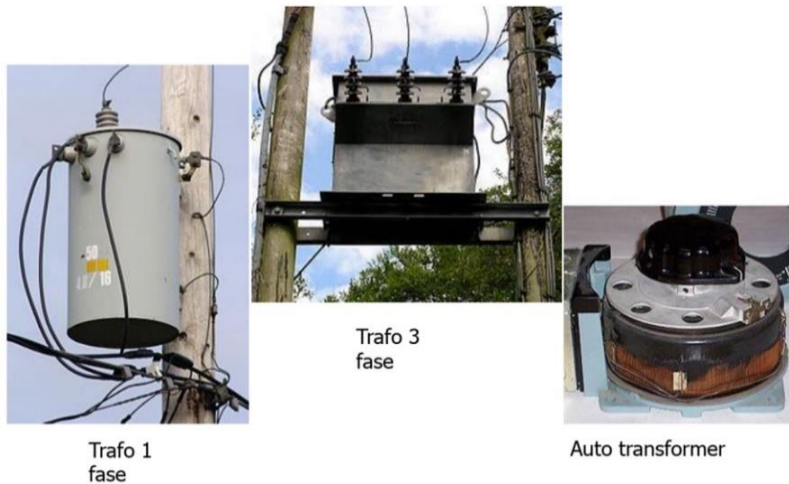
Gambar 5. 20. Minyak transformator.

**b. Kertas isolasi transformator**

Fungsi kertas isolasi pada transformator adalah sebagai isolasi, pemberi jarak, dan memiliki kemampuan mekanis. Gambar kertas isolasi transformator dapat dilihat pada Gambar 5.21.



Gambar 5. 21. Kertas isolasi transformator.



Gambar 5. 22. Penggunaan transformator.



Gambar 5. 23. Transformator daya.



Gambar 5. 24. Transformator tegangan ekstra tinggi (TET).

### **5.5 Soal Latihan**

1. Apa kegunaan dan fungsi dari transformator.
2. Jelaskan dan Gambarkan konstruksi transformator?
3. Jelaskan Gambar 5.22, Gambar 5.23 dan Gambar 5.24 beserta bagian konstruksinya dan fungsinya masing-masing, serta penggunaannya dalam sistem tenaga listrik.

# BAB 6

## PRINSIP KERJA TRANSFORMATOR

### TRANSFORMATOR IDEAL

#### 6.1 Pendahuluan

Dalam sistem tenaga listrik, transformator digunakan untuk memindahkan energi dari satu rangkaian listrik ke rangkaian listrik berikutnya tanpa mengubah frekuensi. Biasanya trafo dapat menaikkan atau menurunkan tegangan maupun arus, sehingga memungkinkan transmisi ekstra tegangan tinggi.

Pemakaian transformator pada sistem tenaga listrik dapat dibagi:

1. **Transformator penaik tegangan (*step up*)** atau disebut **transformator daya**, untuk menaikkan tegangan pembangkitan menjadi tegangan transmisi.
2. **Transformator penurun tegangan (*step down*)**, dapat disebut **transformator distribusi**, untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi.
3. **Transformator instrumen**, untuk pengukuran yang terdiri dari transformator tegangan dan trafo arus, dipakai untuk menurunkan tegangan dan arus agar dapat masuk ke meter-meter pengukuran.

Transformator pada sistem tenaga untuk kapasitas besar dapat dihubungkan tiga fase dan untuk kapasitas kecil dapat dihubungkan satu fasa.

Dalam rangkaian elektronik, transformator digunakan sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban, memisahkan satu rangkaian dari rangkaian yang lain, dapat menghambat arus searah sambil melalukan arus bolak-balik, dayanya cukup kecil.

#### 6.2 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja transformator adalah berdasarkan hukum Ampere dan hukum Faraday, yaitu: arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan sebaliknya medan magnet dapat menimbulkan arus listrik. Jika pada salah satu kumparan pada transformator diberi arus bolak balik maka jumlah garis gaya magnet berubah-ubah, sehingga pada sisi primer terjadi induksi dan

sisi sekunder menerima garis gaya magnet dari sisi primer yang jumlahnya berubah-ubah pula. Maka di sisi sekunder juga timbul induksi, akibatnya antara dua ujung terdapat beda tegangan.

Transformator terdiri atas dua buah kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektris namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi (*reluctance*) rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks di kumparan primer terjadi induksi (*self-induction*) dan terjadi pula induksi di kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \text{ (volt)} \quad (1)$$

dimana :

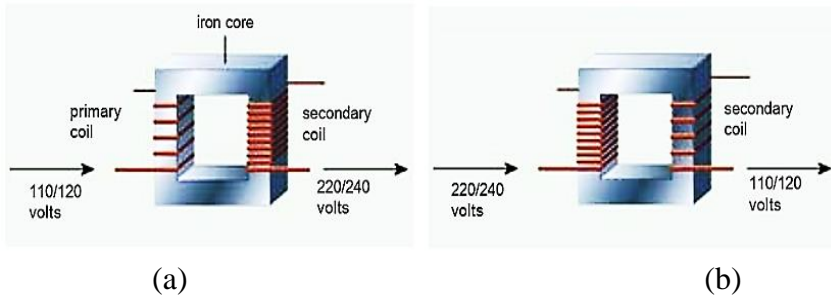
$e$  = gaya gerak listrik (ggl), dalam volt

$N$  = jumlah lilitan

$\frac{d\phi}{dt}$  = perubahan fluks magnet

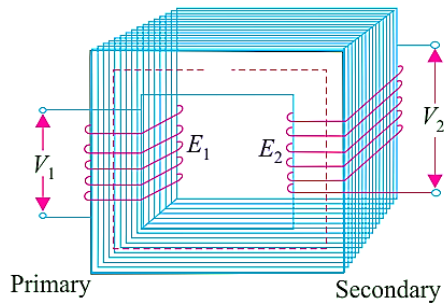
Perlu diingat bahwa hanya tegangan listrik arus bolak-balik yang dapat ditransformasikan oleh transformator, sedangkan dalam bidang elektronika, transformator digunakan sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan arus bolak-balik antara rangkaian.

Sebuah transformator terdiri dari dua buah kumparan, yaitu satu buah kumparan primer dan satu buah kumparan sekunder. Kedua kumparan ini terletak pada sebuah inti besi yang sama agar transformator dapat bekerja. Transformator hanya dapat bekerja jika diberi sumber tegangan arus bolak-balik.

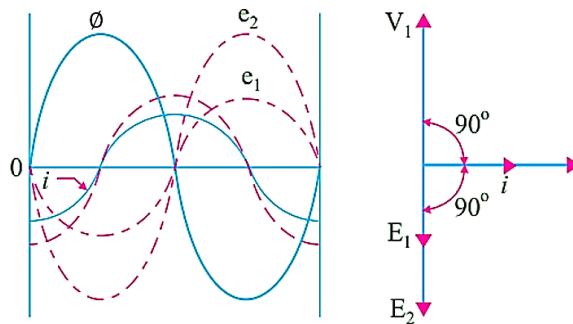


Gambar 6. 1. Transformator (a) *step up*, dan (b) *step down*.

Sebuah transformator yang diberikan tegangan sinusoidal (V) pada sisi primernya akan menghasilkan arus magnetisasi ( $I_{\mu}$ ) pada kumparan primernya. Arus ini akan menghasilkan fluks magnetik ( $\phi$ ) pada inti besi transformator. Fluks magnetik pada inti transformator akan menghasilkan ggl lawan pada kumparan primer ( $E_1$ ) dan ggl lawan pada kumparan sekunder ( $E_2$ ). Bentuk gelombang tegangan, arus dan fluks pada sebuah transformator terlihat pada Gambar 6.3.



Gambar 6. 2. Transformator sisi primer dan sekunder.



Gambar 6. 3. Bentuk gelombang tegangan, arus dan fluks pada sebuah transformator.

Fluks yang terjadi pada inti trafo bernilai maksimum pada  $1/4f$ . Perubahan fluks rata-rata dinyatakan oleh persamaan :

$$\frac{\Phi_m}{\frac{1}{4f}} = 4f\Phi_m \text{ Wb/detik}$$

GGL induksi dalam volt yang dihasilkan adalah sama dengan perubahan fluks rata rata per lilitan, yaitu :

$$4f\Phi_m \text{ Wb/detik/lilitan} = 4f\Phi_m \text{ volt}$$

Nilai *rms* ggl induksi yang dihasilkan jika gelombang tegangan arus bolak-baliknya berbentuk sinusoida adalah  $1,11 \times 4f\Phi_m$  Volt.

Maka GGL induksi seluruh kumparan primer dengan  $N_1$  lilitan adalah :

$$E_1 = 1,11 N_1 4f\Phi_m \text{ volt}$$

$$E_1 = 4,44 fN_1\Phi_m \text{ volt} \quad (2)$$

Demikian juga pada kumparan sekunder :

$$E_2 = 4,44 fN_2\Phi_m \text{ volt} \quad (3)$$

**Pada trafo ideal**, dengan mengabaikan rugi-rugi penghantar dan inti besi, nilai tegangan terminal kumparan primer  $V_1 = E_1$  dan tegangan kumparan sekunder  $V_2 = E_2$ .

Maka tegangan terminal kumparan primer dengan  $N_1$  lilitan adalah :

$$V_1 = E_1 = 4,44 fN_1\Phi_m \text{ volt} \quad (4)$$

Demikian juga pada kumparan sekunder :

$$V_2 = E_2 = 4,44 fN_2\Phi_m \text{ volt} \quad (5)$$

Perbandingan tegangan antara kumparan primer dan kumparan sekunder disebut sebagai **rasio transformasi tegangan ( $a$ )**. Besarnya rasio transformasi tegangan dinyatakan oleh persamaan :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (6)$$

Dengan  $E$  adalah **ggl induksi**,  $V$  adalah **tegangan terminal** dan  $N$  adalah **jumlah lilitan pada kumparan transformator**.

### 6.2.1 Persamaan *EMF* Transformator

Misalkan:

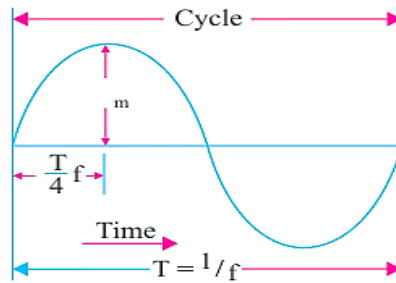
$N_1$  = jumlah lilitan sisi primer

$N_2$  = jumlah lilitan sisi sekunder

$\Phi_m$  = fluks maksimum dalam inti (weber)

$\Phi_m = B_m \times A$

$f$  = frekuensi input ac (Hz)



Gambar 6. 4. Siklus fluks sinusoidal lengkap.

Pada Gambar 6.4, fluks naik dari nilai nol ke nilai maksimum  $\Phi_m$  dalam seperempat siklus yaitu  $\frac{1}{4f}$  detik.

Laju perubahan fluks rata-rata =  $\frac{\Phi_m}{\frac{1}{4f}} = 4f\Phi_m \frac{\text{Wb}}{\text{detik}}$  atau volt

Laju perubahan fluks per lilitan rata-rata yang menginduksikan emf dalam volt :

$$\text{emf / lilitan rata-rata} = 4f\Phi_m \text{ volt} \quad (7)$$

Bila fluks  $\Phi$  berubah secara sinusoidal, maka nilai rms dari emf induksi ditentukan dengan mengalikan nilai rata-rata dengan faktor bentuk.

$$\text{Faktor Bentuk} = \frac{\text{nilai rms}}{\text{nilai rata - rata}} = 1,11 \quad (8)$$

Maka nilai rms dari emf/lilitan =  $1,11 \times 4f\Phi_m = 4,44 f\Phi_m$  volt

Nilai *rms* dari emf induksi untuk seluruh lilitan primer

$$= (\text{emf induksi/turn}) \times \text{jumlah lilitan primer}$$

$$E_1 = 4,44 f N_1 \Phi_m = 4,44 f N_1 B_m A \text{ volt} \quad (9)$$

Demikian juga, nilai rms emf induksi pada sisi sekunder,

$$E_2 = 4,44 f N_2 \Phi_m = 4,44 f N_2 B_m A \text{ volt} \quad (10)$$

Dari persamaan (i) dan (ii) bahwa:

$$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2} = 4,44 f \Phi_m$$

Hal ini menunjukkan bahwa emf/turn sama baik pada sisi primer dan sisi sekunder.

Untuk transformator ideal tanpa beban,  $V_1 = E_1$  dan  $V_2 = E_2$  dimana  $V_2$  adalah tegangan terminal.

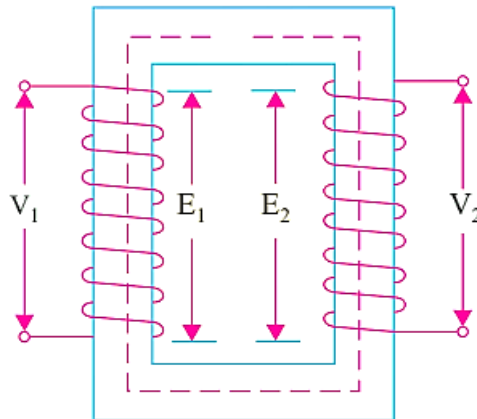
### 6.2.2 Rasio Transformasi Tegangan (K)

Dari Persamaan (i) dan (ii) diperoleh:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

Konstanta  $K$  disebut sebagai **Rasio Transformasi Tegangan**.

- (i) Jika  $N_2 > N_1$ , maka  $a < 1$ , transformator disebut sebagai *Transformator Step-up*.
- (ii) Jika  $N_2 < N_1$ , maka  $a > 1$ , transformator disebut sebagai *Transformator Step-down*.



Gambar 6. 5. Tegangan  $V_1$  pada sisi primer dan tegangan  $V_2$  pada sisi sekunder.

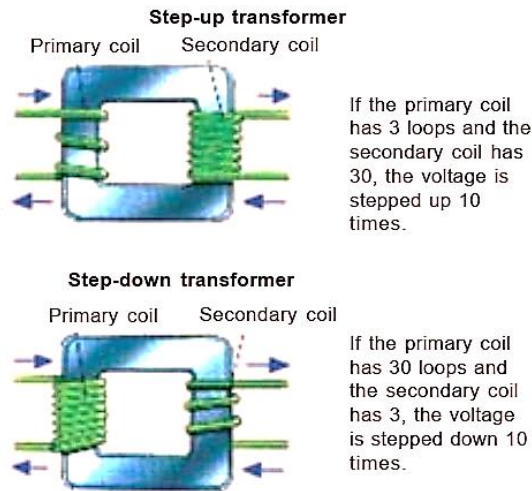
Pada transformator ideal, berlaku : **VA input = VA output**.

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (11)$$

atau,

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = a \quad (12)$$

Dari persamaan tersebut, diperoleh bahwa arus merupakan rasio terbalik terhadap rasio tegangan transformasi.

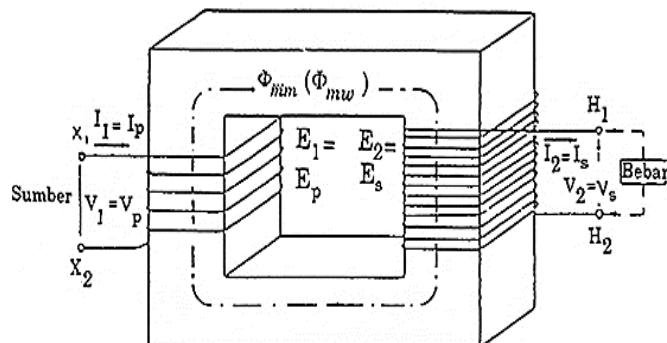


Gambar 6. 6. Prinsip transformator *step-up* dan *step-down*.

### 6.2.3 Kondisi Transformator Ideal

Pada Gambar 6.7, sisi belitan  $X_1X_2$  adalah sisi tegangan rendah dan sisi belitan  $H_1H_2$  adalah sisi tegangan tinggi.

Bila salah satu sisi, baik sisi tegangan tinggi (*TT*), maupun sisi tegangan rendah (*TR*) dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka sisi tersebut, disebut dengan sisi primer, sedangkan sisi lain yang dihubungkan dengan beban disebut sisi sekunder.



Gambar 6. 7. Transformator ideal.

Sisi belitan  $X_1X_2$  dihubungkan dengan sumber tegangan bolak balik sebesar  $V_1 = V_p$  maka fluks bolak balik akan dibangkitkan pada inti sebesar  $\phi_{mm}$  atau sebesar  $\phi_{mw}$ .

Fluks sebesar  $\phi_{mm} = \phi_{mw}$  akan melingkar dan menghubungkan belitan kawat primer dengan belitan kawat sekunder serta menghasilkan tegangan induksi ( $EMF = GGL$ ) baik pada belitan primer sebesar  $E_1 = E_p$ , maupun pada belitan sekunder sebesar  $E_2 = E_s$ , yang mengikuti persamaan berikut :

$$E_1 = E_p = 4,44 \times f \times N_p \times \phi_{mm} \times 10^{-8} \text{ volt} \quad (13)$$

atau,

$$E_1 = E_p = 4,44 \times f \times N_p \times \phi_{mw} \quad (14)$$

$$E_2 = E_s = 4,44 \times f \times N_s \times \phi_{mm} \times 10^{-8} \text{ volt} \quad (15)$$

atau,

$$E_2 = E_s = 4,44 \times f \times N_s \times \phi_{mw} \quad (16)$$

dengan,

$E_1 = E_p$  =  $EMF$  (ggl) atau tegangan induksi yang dibangkitkan pada belitan primer

$E_2 = E_s$  =  $EMF$  (ggl) atau tegangan induksi yang dibangkitkan pada belitan sekunder

$N_1 = N_p$  = Banyaknya lilitan pada belitan sisi primer

$N_2 = N_s$  = Banyaknya lilitan pada belitan sisi sekunder

$\phi_{mm}$  = Fluks maksimum dalam besaran maxwell

$\phi_{mw}$  = Fluks maksimum dalam besar weber

$f$  = Frekuensi arus dan tegangan sistem

$V_1 = V_p$  = Tegangan sumber yang masuk di sisi primer

$V_2 = V_s$  = Tegangan sekunder ke beban

Fluks maksimum dalam besaran maxwell dan fluks maksimum dalam besaran weber, hubungannya akan mengikuti persamaan berikut:

$$\phi_{mm} = \phi_{mw} = B_m \times A \quad (17)$$

dengan,

$B_m$  = Kerapatan fluks maksimum

$A$  = Luas penampang dari inti dalam  $m^2$

Untuk **trafo ideal** diatas berlaku persamaan berikut:

$$V_1 = E_1 = V_p = E_p \text{ dan } V_2 = E_2 = V_s = E_s \quad (18)$$

#### 6.2.4 Perbandingan Transformasi

Dari persamaan (14) dan persamaan (16) didapatkan perbandingan  $EMF$  pada primer dan sekunder sama dengan perbandingan banyaknya lilitan primer dan sekunder, merupakan perbandingan (rasio) transformasi dari transformator dan dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (19)$$

Berdasarkan persamaan (18) maka untuk trafo ideal berlaku perbandingan dari transformator dan dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (20)$$

Jika rugi-rugi trafo tidak diperhitungkan dan efisiensi dianggap 100% (kondisi ideal) maka:

$$E_1 \times I_1 \times PF_1 = E_2 \times I_2 \times PF_2 \quad (21)$$

Secara praktis,

$$\mathbf{faktor\ daya\ primer\ (PF_1) = faktor\ daya\ sekunder\ (PF_2)}$$

sehingga:

$$E_1 \times I_1 = E_2 \times I_2 \quad (22)$$

atau,

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = a \quad (23)$$

Disini, diperoleh rasio transformator  $a$ .

#### Contoh Soal 1.

Suatu transformator ideal satu fasa mempunyai 200 lilitan pada belitan primer dan 100 lilitan pada sekunder. Jika belitan primer dihubungkan dengan tegangan sumber sebesar 200 volt dan arus beban sekunder 20 Ampere. Hitunglah:

- Arus primer.
- Tegangan sekunder.

#### Penyelesaian:

- $N_1 = 200$  lilitan;  $N_2 = 100$  lilitan,  $V_1 = 200$  volt;  $V_2 = 20$  A  
maka,

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{200}{100} = 2$$

$$\frac{I_2}{I_1} = a \rightarrow \frac{20}{I_1} = 2 \rightarrow I_1 = 10 \text{ Amper}$$

b. Tegangan sekunder  $E_2$ ,

$$E_2 = \frac{E_1}{a} = \frac{200}{2} = 100 \text{ volt}$$

### Contoh Soal 2.

Suatu transformator ideal satu fasa mempunyai 400 lilitan primer dan 1000 lilitan sekunder, luas penampang inti  $60 \text{ cm}^2$ . Jika belitan primer dihubungkan pada sumber tegangan 520 volt dan frekuensi 50 Hz, hitunglah:

- Harga maksimum kerapatan fluks pada inti?
- Tegangan induksi pada belitan sekunder.

### Penyelesaian:

a. Diketahui:  $N_1 = 400$  lilitan dan  $N_2 = 1000$  lilitan, maka

$$\begin{aligned} E_1 &= 4,44 \times f \times N_1 \times \phi_{mw} \text{ volt} \\ &= 4,44 \times f N_1 \times B_m \times A \text{ volt} \end{aligned}$$

$$520 = 4,44 \times 50 \times 400 \times B_m \times (60 \times 10^{-4}) \text{ volt}$$

$$B_m = 0,976 \text{ weber/m}^2$$

Sehingga, kerapatan fluks maksimum pada inti  $0,976 \text{ weber/m}^2$ .

b. Diketahui:  $N_1 = 400$  lilitan dan  $N_2 = 1000$  lilitan, sehingga:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{400}{1000} = 0,4$$

$$\frac{E_1}{E_2} = a \rightarrow \frac{520}{E_2} = 0,4 \rightarrow E_2 = 1300 \text{ volt}$$

Tegangan induksi pada belitan sekunder 1300 volt.

### Contoh Soal 3.

Kerapatan fluks maksimum pada inti transformator 250/3000 volt, 50 Hz satu fasa adalah  $1,2 \text{ Wb/m}^2$ . Jika emf per lilitan 8 volt, hitunglah:

- Jumlah lilitan primer dan sekunder.
- Luas inti transformator.

**Penyelesaian:**

- a. Diketahui  $E_1 = 250$  volt,  $E_2 = 3000$  volt

$$E_1 = N_1 \times emf \text{ induksi/lilitan}$$

$$N_1 = \frac{250}{8} = 32; \quad N_2 = \frac{3000}{8} = 375$$

- b. Karena  $E_2 = 3000$  volt

$$E_2 = 4,44 f N_2 B_m A \text{ volt}$$

$$3000 = 4,44 \times 50 \times 375 \times 1,2 \times A$$

$$A = 0,03 \text{ m}^2$$

**Contoh Soal 4.**

Suatu inti transformator 100-kVA, 11000/550 V, 50-Hz, 1 fasa, memiliki luas penampang melintang inti 20 cm × 20 cm. Hitunglah:

- Jumlah lilitan per fasa pada sisi *HV* dan *LV*.
- EMF* per lilitan jika kerapatan fluks maksimum inti tidak melebihi 1.3 Tesla. Asumsikan bahwa faktor stacking 0.9.
- Apakah yang akan terjadi jika tegangan primer dinaikkan 10% pada kondisi tanpa beban?

**Penyelesaian:**

- a.  $B_m = 1.3$  T,

$$A = (0.2 \times 0.2) \times 0.9 = 0.036 \text{ m}^2$$

Rasio trafo,

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{11,000}{550}$$

Karena trafo diasumsikan trafo ideal, maka  $V_1 = E_1$

$$E_1 = 4.44 f N_1 B_m A$$

$$11,000 = 4.44 \times 50 \times N_1 \times 1.3 \times 0.036 \Rightarrow N_1 = 1060$$

$$550 = 4.44 \times 50 \times N_2 \times 1.3 \times 0.036 \Rightarrow N_2 = 53$$

atau,

$$a = \frac{N_1}{N_2} \Leftrightarrow N_2 = \frac{N_1}{a} = \left( \frac{550}{11,000} \right) \times 1060 = 53$$

- b.  $EMF/lilitan = 11,000/1060 = 10.4$  V atau  $550/53 = 10.4$  V

- c. Dengan menjaga frekuensi sumber tetap, sehingga jika tegangan primer dinaikkan 10%, maka arus magnetisasi akan meningkat hingga 10%. Tetapi, karena saturasi magnet, maka kerapatan fluks magnet hanya akan meningkat pada batas tertentu dan demikian juga halnya dengan rugi-rugi arus eddy dan hysteresis.

**Contoh Soal 5.**

Trafo satu fasa memiliki 400 lilitan primer dan 1000 lilitan sekunder. Luas penampang bersih inti adalah 60 cm<sup>2</sup>. Jika belitan primer dihubungkan ke suplai 50-Hz pada 520 V, hitunglah:

- nilai puncak kerapatan fluks di inti.
- tegangan yang induksi pada belitan sekunder.

**Penyelesaian:**

a.  $a = N_1/N_2 = 400/1000 = 0,4$

Rasio trafo:  $\frac{E_1}{E_2} = a$

Sehingga,  $E_2 = E_1/a = 520/0,4 = 1300 V$

b.  $E_1 = 4.44 f N_1 B_m A$

$520 = 4.44 \times 50 \times 400 \times B_m \times (60 \times 10^{-4})$

sehingga  $B_m = 0.976 Wb/m^2$ .

**Contoh Soal 6.**

Trafo 25 kVA memiliki 500 lilitan pada belitan primer dan 50 lilitan pada belitan sekunder. Primer terhubung ke suplai 3000-V, 50-Hz. Hitunglah arus primer dan sekunder saat beban penuh, *e.m.f.* dan fluks maksimum dalam inti. Abaikan rugi-rugi bocor dan arus primer tanpa beban.

**Penyelesaian:**

$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{500}{50} = 10$

Saat beban penuh, dimana  $S (kVA) = VI$ , sehingga,

$I_1 = 25,000 VA/3000 V = 8.33 A$

$I_2 = aI_1 = 10 \times 8.33 = 83.3 A$

$$e.m.f. \text{ per lilitan pada sisi primer} = \frac{3000}{500} = 6 \text{ V}$$

$$\text{sehingga, } e.m.f. \text{ sekunder} = 6 \times 50 = 300 \text{ V}$$

atau

$$a = \frac{E_1}{E_2} \Leftrightarrow E_2 = \frac{E_1}{a} = \frac{3000 \text{ V}}{10} = 300 \text{ V}$$

$$E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

$$3000 = 4.44 \times 50 \times 500 \times \Phi_m$$

$$\Phi_m = 27 \text{ mWb}$$

### 6.3 Soal Latihan

1. Suatu trafo 25 kVA mempunyai lilitan primer sebanyak 500 dan lilitan sekunder 50. Primer dihubungkan dengan sumber tegangan sebesar 3000 volt, 50 Hz. Hitunglah arus primer dan sekunder untuk beban penuh jika trafo ideal? Berapa fluks pada inti, dan *emf* sekunder?
2. Suatu trafo 4600/230 volt, 60 Hz, 7,5 kVA, jika dimisalkan trafo ideal, hitunglah:
  - a. Perbandingan transformasi.
  - b. Arus primer dan sekunder jika beban penuh.
3. Trafo 1-fasa 3000/200-V, 50-Hz, dibuat pada inti yang memiliki luas penampang efektif  $150 \text{ cm}^2$  dan memiliki 80 lilitan pada belitan tegangan rendah. Hitunglah:
  - a. nilai kerapatan fluks maksimum dalam inti.
  - b. jumlah belitan pada belitan tegangan tinggi.
 [Jawaban: (a)  $0,75 \text{ Wb/m}^2$  (b) 1200]
4. Transformator 1-fasa 3.300/230-V, 50-Hz, harus bekerja pada kerapatan fluks maksimum  $1,2 \text{ Wb/m}^2$  di dalam inti. Luas penampang efektif inti transformator adalah  $150 \text{ cm}^2$ . Hitunglah nilai lilitan primer dan sekunder.  
[Jawaban: 830; 58]
5. Trafo 1-fasa 40-kVA, 3.300/240-V, 50 Hz, memiliki 660 lilitan pada primer. Rugi-rugi internal pada belitan diabaikan. Hitunglah:

- a. jumlah lilitan pada sekunder.
- b. nilai fluks maksimum dalam inti.
- c. nilai perkiraan arus beban penuh primer dan sekunder.

[Jawaban: (a) 48 (b) 22.5 mWb (c) 12.1 A; 166.7 A]

# BAB 7

## RANGKAIAN EKIVALEN DAN PENGUJIAN TRANSFORMATOR

### 7.1 Pendahuluan

Pokok bahasan pada modul ini membahas mengenai kondisi transformator yang sebenarnya, juga membahas rangkaian ekivalen dan akhirnya, pengujian-pengujian pada transformator.

### 7.2 Transformator Tanpa Beban

Dalam pembahasan sebelumnya, diasumsikan *trafo ideal yaitu trafo yang tidak ada rugi inti dan rugi tembaga*. Tetapi kondisi praktis membutuhkan modifikasi tertentu dalam teori sebelumnya. Ketika transformator aktual dibebani, ada rugi besi pada inti dan rugi tembaga pada belitan (baik primer maupun sekunder) dan kerugian ini tidak sepenuhnya dapat diabaikan.

Sekalipun transformator dalam keadaan tanpa beban, arus input primer tidak sepenuhnya reaktif. Arus input primer dalam kondisi tanpa beban harus mensuplai:

- (i) rugi-rugi besi di teras yaitu rugi-rugi histeresis dan arus eddy, dan
- (ii) rugi-rugi tembaga dalam jumlah yang sangat kecil di primer (tidak ada rugi-rugi  $C_u$  di sekunder karena sekunder dalam kondisi rangkaian terbuka).

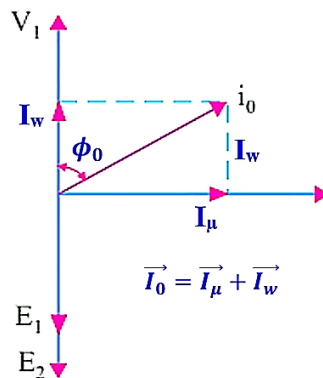
Oleh karena itu, arus input primer tanpa beban  $I_0$  tidak berada pada  $90^\circ$  tertinggal dari  $V_1$  tetapi tertinggal dengan sudut  $\phi_o < 90^\circ$ . Daya input tanpa beban:

$$W_0 = V_1 I_0 \cos \phi_o \quad (1)$$

dengan  $\cos \phi_o$  adalah faktor daya utama dalam kondisi tanpa beban. Kondisi tanpa beban dari transformator aktual ditunjukkan secara vektor pada Gambar 7.1.

Seperti yang terlihat pada Gambar 7.1, arus primer  $I_0$  memiliki dua komponen:

- (i) Satu fase dengan  $V_1$ . Dikenal sebagai komponen rugi besi atau rugi aktif atau atau rugi kerja karena komponen  $I_w$  ini terutama memasok rugi-rugi besi ditambah sejumlah kecil rugi-rugi  $C_u$  primer,  $I_w = I_0 \cos \phi_0$ .
- (ii) Komponen lainnya berada pada kuadratur dengan  $V_1$  dan disebut sebagai komponen magnetisasi  $I_\mu$  karena fungsinya untuk menopang fluks bolak-balik pada inti,  $I_\mu = I_0 \sin \phi_0$ .



Gambar 7. 1. Diagram fasor kondisi tanpa beban dari transformator.

Dari Gambar 7.1, diperoleh  $I_0$  adalah jumlah vektor  $I_w$  dan  $I_\mu$  dimana:

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_\mu + \vec{I}_w$$

atau, dalam besar  $I_0$  :

$$I_0 = \sqrt{(I_\mu^2 + I_w^2)} \angle \tan^{-1} \left( \frac{I_\mu}{I_w} \right) \quad (2)$$

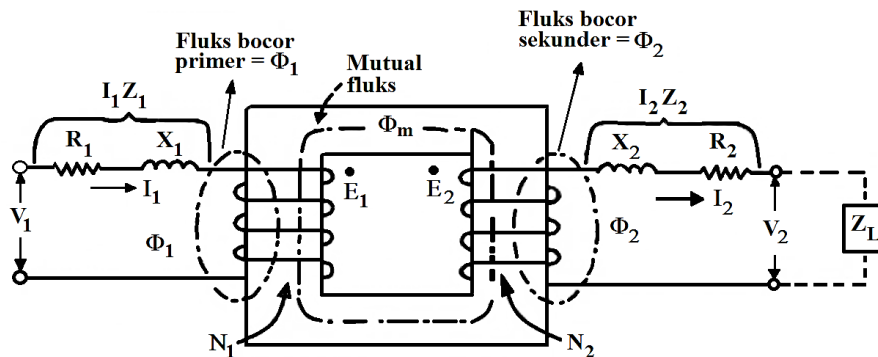
Hal-hal berikut yang harus diperhatikan dengan cermat:

1. Arus primer tanpa beban  $I_0$  sangat kecil dibandingkan dengan arus primer beban penuh, sekitar 1 persen dari arus beban penuh.
2. Karena fakta bahwa permeabilitas inti bervariasi dengan nilai sesaat dari arus penguat, maka gelombang arus penguat atau arus magnetisasi tidak benar-benar sinusoidal. Karena itu tidak boleh direpresentasikan oleh vektor karena hanya besaran yang bervariasi secara sinusoidal yang diwakili oleh vektor yang berputar. Namun, dalam praktiknya, tidak ada perbedaan yang berarti.

3. Karena  $I_0$  sangat kecil, maka rugi-rugi  $C_u$  primer tanpa beban sangat kecil yang berarti bahwa input primer tanpa beban secara praktis sama dengan rugi besi pada transformator.
4. Karena pada prinsipnya rugi-rugi inti yang bertanggung jawab atas pergeseran vektor arus, maka sudut  $\phi_0$  dikenal sebagai *sudut histeresis lanjutan*.

### 7.3 Kondisi Tranformator Secara Praktis

Transformator yang dibahas sebelumnya adalah trafo ideal, tetapi praktisnya belitan trafo mempunyai resistansi dan reaktansi bocor, baik sisi primer maupun sisi sekunder, lihat Gambar 7.2.



Gambar 7. 2. Transformator secara praktis dengan beban.

Dari Gambar 7.2 tersebut, maka parameter serta persamaan yang menyatakan hubungan parameter adalah sebagai berikut:

- a.  $\phi_1$  = Fluks bocor primer
- b.  $\phi_2$  = Fluks bocor sekunder
- c.  $R_1$  = Resistansi belitan primer
- d.  $R_2$  = Resistansi belitan sekunder
- e.  $X_1$  = Reaktansi bocor induktif dari lilitan primer karena fluks bocor primer  $\phi_1$
- f.  $X_2$  = Reaktansi bocor induktif dari lilitan sekunder karena fluks bocor primer  $\phi_2$
- g. Impedansi belitan primer dinyatakan oleh persamaan:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \angle \tan^{-1} \frac{X_1}{R_1} \quad (3)$$

h. Impedansi belitan sekunder dinyatakan oleh persamaan:

$$Z_2 = R_2 + jX_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} \angle \tan^{-1} \frac{X_2}{R_2} \quad (4)$$

i. Karena trafo berbeban maka arus yang mengalir mengakibatkan rugi tegangan pada primer maupun pada sekunder, secara vektor dituliskan sebagai berikut:

$$\vec{E}_1 = \vec{V}_1 - \vec{I}_1 Z_1 = \vec{V}_1 - I_1 \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \quad (5)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{V}_2 + \vec{I}_2 Z_2 = \vec{V}_2 + I_2 \sqrt{R_2^2 + X_2^2} \quad (6)$$

j. Dari persamaan (3) dan (4) didapatkan persamaan (5):

$$V_1 > E_1 \quad \text{dan} \quad V_2 < E_2 \quad (7)$$

### Contoh Soal 1.

Suatu trafo penurun tegangan dari 2300 volt menjadi 230 volt, mempunyai daya 750 kVA dan 60 Hz. Resistansi dan reaktansi dari belitan:

$$R_1 = 0,093 \text{ ohm}, X_1 = 0,280 \text{ ohm}$$

$$R_2 = 0,0093 \text{ ohm}, X_2 = 0,0028 \text{ ohm}$$

Trafo bekerja dengan beban penuh, hitunglah:

- Arus primer dan sekunder.
- Impedansi belitan primer dan sekunder.
- Jatuh tegangan pada belitan primer dan sekunder.
- Tegangan induksi pada belitan primer dan sekunder.
- Perbandingan transformasi.
- Perbandingan transformasi tegangan.

### Penyelesaian:

a. Arus primer:

$$I_1 = \frac{S \text{ (VA)}}{V_1 \text{ (volt)}} = \frac{750.000}{2300} = 326,1 \text{ Amper}$$

Arus sekunder:

$$I_2 = \frac{S (VA)}{V_2 (volt)} = \frac{750.000}{230} = 3261 \text{ Amper}$$

b. Impedansi belitan primer:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{(0,093)^2 + (0,280)^2} = 0,295 \text{ ohm}$$

Impedansi belitan sekunder:

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{(0,0093)^2 + (0,0028)^2} = 0,00295 \text{ ohm}$$

c. Jatuh tegangan pada belitan primer:  $I_1 Z_1 = 326,1 \times 0,295 = 96,2 \text{ volt}$

Jatuh tegangan pada belitan sekunder:  $I_2 Z_2 = 3261 \times 0,00295 = 9,62 \text{ volt}$

d. Tegangan induksi pada belitan primer:

$$E_1 = V_1 - I_1 Z_1 = 2300 - 92,6 = 2203,8 \text{ volt}$$

Tegangan induksi pada belitan sekunder:

$$E_2 = V_2 + I_2 Z_2 = 230 - 9,26 = 239,62 \text{ volt}$$

e. Perbandingan transformasi

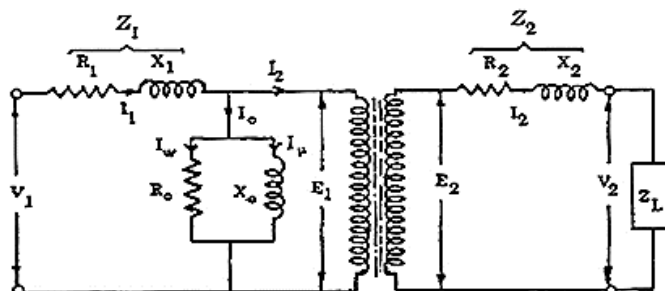
$$a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{2203,8}{239,62} = 9,198$$

f. Perbandingan transformasi tegangan:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{2300}{230} = 10$$

## 7.4 Rangkaian Ekuivalen Transformator

Transformator yang diperlihatkan pada Gambar 7.2 dapat digambarkan rangkaian listriknya seperti Gambar 7.3 berikut ini.



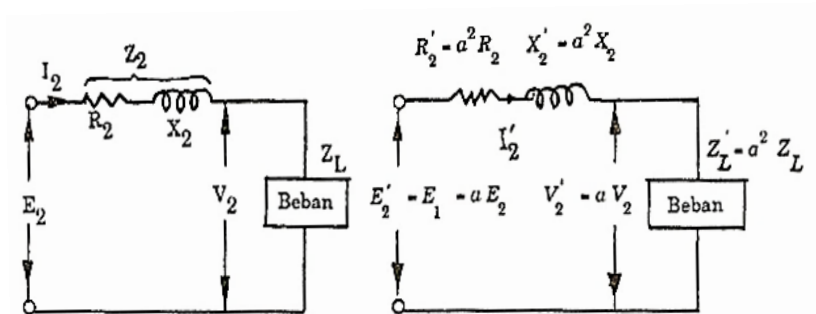
Gambar 7. 3. Rangkaian listrik dari trafo berbeban.

*Arus beban nol* disimulasikan oleh induktansi murni ( $X_o$ ) dengan arus magnetisasi ( $I_\mu$ ) dan reaktansi non induktif ( $R_o$ ) dengan komponen arus ( $I_\omega$ ) yang diparalel menyilang pada rangkaian primer (lihat Gambar 7.3) dimana:

$$X_o = \frac{E_1}{I_\mu} \quad \text{dan} \quad R_o = \frac{E_1}{I_\omega} \quad (8)$$

Untuk membuat perhitungan maka rangkaian trafo pada Gambar 7.3 harus diubah menjadi rangkaian ekuivalen atau rangkaian pengganti trafo, yakni tegangan dan arus serta impedansi dari kedua sisi disatukan pada salah satu sisi trafo, bisa sisi primer atau sisi sekunder.

Bila rangkaian sekunder ditransfer atau dipindahkan ke sisi primer maka besaran tegangan, arus dan impedansinya harus diubah (lihat Gambar 7.4).

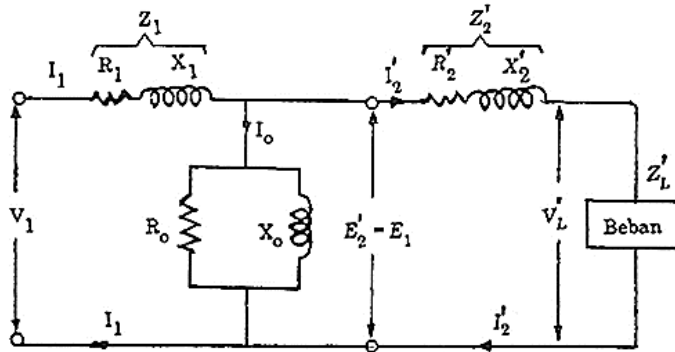


Gambar 7. 4. Rangkaian sekunder trafo ditransfer ke primer.

Perubahan harga besaran tersebut diatas, akan mengikuti persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{a. } R_2' &= a^2 R_2 & ; & & \text{b. } X_2' &= a^2 X_2 \\ \text{c. } I_2' &= I_2/a & ; & & \text{d. } E_2' &= a E_2 = E_1 \\ \text{e. } V_2' &= a V_2 & ; & & \text{f. } Z_L' &= a^2 Z_L \end{aligned} \quad (9)$$

Harga tegangan, arus dan impedansi dari sisi sekunder yang telah disesuaikan dengan menggunakan persamaan (7), berarti besaran-besaran komponen di sisi sekunder telah ditransfer ke sisi primer, sehingga Gambar 7.4 dapat digabung dengan Gambar 7.3 menjadi gambar rangkaian ekuivalen trafo yang sebenarnya dari trafo, lihat Gambar 7.5.



Gambar 7. 5. Rangkaian ekivalen yang sebenarnya dari transformator.

Dari rangkaian ekivalen tersebut dapat dihitung impedansi total rangkaian yang diberikan ke sumber tegangan  $V_1$  sebagai berikut :

$$Z_{total} = Z_1 + \frac{Z_o (Z_2' + Z_L')}{Z_o + Z_2' + Z_L'} \quad (10)$$

dengan,

$$Z_1 = R_1 + jX_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \angle \tan^{-1} \frac{X_1}{R_1}$$

$$Z_2 = R_2' + jX_2' = \sqrt{(R_2')^2 + (X_2')^2} \angle \tan^{-1} \frac{X_2'}{R_2'} \quad (11)$$

$$Z_o = \frac{1}{Y_o} \quad \text{dan} \quad Y_o = \frac{1}{R_o} - j \frac{1}{X_o}$$

### Contoh Soal 2.

Suatu trafo 2300/230 volt, 50 Hz mempunyai parameter:

$$\begin{array}{ll} R_1 = 0,286 \text{ ohm} & X_1 = 0,73 \text{ ohm} \\ R_2' = 0,319 \text{ ohm} & X_2' = 0,73 \text{ ohm} \\ R_o = 250 \text{ ohm} & X_o = 1250 \text{ ohm} \end{array}$$

Impedansi beban sekunder  $Z_L = (0,387 + j 0,29) \text{ ohm}$

Dengan menggunakan rangkaian ekivalen sebenarnya, hitunglah:

- Arus primer
- Arus sekunder
- Arus beban nol
- Faktor daya input (masukan)

- e. Daya input (daya masukan)
- f. Daya output (daya keluaran)
- g. Rugi tembaga primer, sekunder, rugi inti dan efisiensi.

**Penyelesaian:**

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{2300}{230} = 10; \quad Z_L = 0,387 + j 0,29$$

$$Z_L' = a^2 Z_L = 100 (0,387 + j 0,29) = 38,7 + j 29 = 48,4 \angle 36,8^\circ$$

$$Z_2' = 0,319 + j 0,73$$

$$\begin{aligned} Z_2' + Z_L' &= 0,319 + j0,73 + 38,7 + j29 = 39,02 + j29,73 \\ &= 49,0 \angle 37,3^\circ \end{aligned}$$

$$Y_o = \frac{1}{R_o} - j \frac{1}{X_o} = \frac{1}{250} - j \frac{1}{1250} = (0,004 - j0,0008) \text{ S}$$

$$Z_o = \frac{1}{Y_o} = 240 + j48 = 245 \angle 11,3^\circ \Omega$$

$$Z_o + Z_2' + Z_L' = 39,02 + j29,73 + 240 + j48 = 290 \angle 15,6^\circ$$

a. Arus primer:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{V_1}{Z_1 + \frac{Z_o(Z_2' + Z_L')}{Z_o + Z_2' + Z_L'}} = \frac{2300 \angle 0^\circ}{0,286 + j0,73 + 41,4 \angle 33^\circ} \\ &= \frac{2300 \angle 0^\circ}{42 \angle 33,7^\circ} = 54,8 \angle -33,7^\circ \end{aligned}$$

b. Arus sekunder:

$$\begin{aligned} I_2' &= I_1 \times \frac{Z_o}{Z_o + Z_2' + Z_L} = 54,8 \angle -33,7^\circ \times \frac{245 \angle 11,37^\circ}{290 \angle 15,6^\circ} \\ &= 54,8 \angle -33,7^\circ \times 0,845 \angle -4,3^\circ = 46,2 \angle -38^\circ \end{aligned}$$

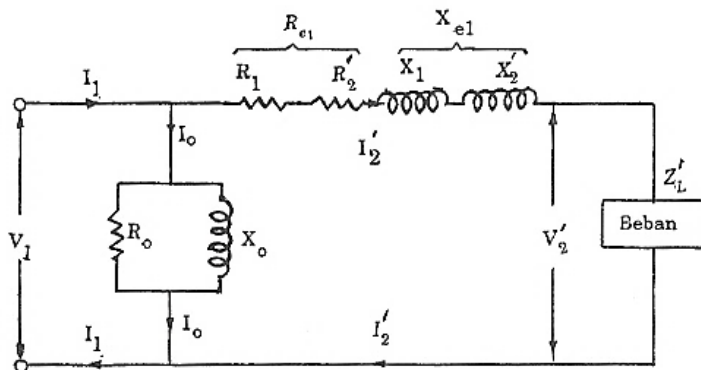
c. Arus beban nol:

$$\begin{aligned} I_o &= I_1 \times \frac{Z_2' + Z_L'}{Z_o + Z_2' + Z_L'} = 54,8 \angle -33,7^\circ \times \frac{49 \angle 37,3^\circ}{290 \angle 15,6^\circ} \\ &= 54,8 \angle -33,7^\circ \times 0,169 \angle 21,7^\circ = 9,26 \angle -12^\circ \end{aligned}$$

d. Faktor daya input (masukan) =  $\cos 33,7^\circ = 0,832$  mengikuti.

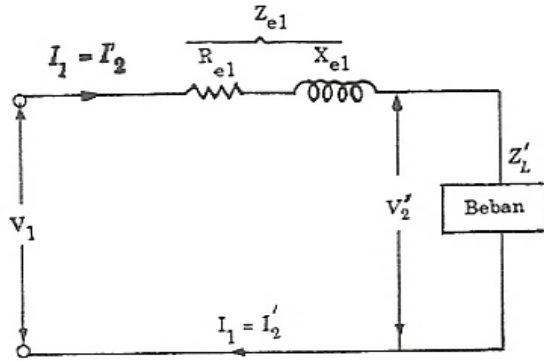
- e. Daya input (daya masukan) =  $V_1 I_1 \cos \phi_1 = 2300 \times 54,8 \times 0,832 = 105 \text{ kW}$ .
- f. Daya output (daya keluaran) =  $I_2'^2 R_L' = 46,2^2 \times 38,7 = 82,6 \text{ kW}$ .
- g. Rugi tembaga primer =  $I_1^2 R_1 = 54,8^2 \times 0,286 = 860 \text{ kW}$   
 Rugi tembaga sekunder =  $I_2'^2 R_2' = 46,2^2 \times 0,319 = 680 \text{ kW}$   
 Rugi inti =  $I_0^2 R_0 = 9,26^2 \times 250 = 20,6 \text{ kW}$   
 Efisiensi,  $\eta = \frac{82,6}{105} \times 100\% = 78,7\%$

Penyelesaian soal trafo dengan menggunakan rangkaian ekivalen yang sebenarnya memerlukan ketelitian, sehingga lebih mudah bila digunakan rangkaian ekivalen pendekatan, dimana rangkaian penguat pada Gambar 7.5 dipindahkan ke terminal primer seperti Gambar 7.6 berikut ini.



Gambar 7. 6. Rangkaian ekivalen pendekatan dari transformator.

Rangkaian ekivalen pendekatan tersebut masih dapat disederhanakan bila arus beban nol ( $I_0$ ) cukup kecil, sehingga dapat diabaikan, dan Gambar 7.6 menjadi lebih sederhana seperti Gambar 7.7.



Gambar 7. 7. Rangkaian ekuivalen pendekatan dari trafo dengan mengabaikan arus beban nol.

Parameter rangkaian trafo seperti pada Gambar 7.8 tersebut akan mengikuti persamaan berikut:

- a. Resistansi ekuivalen trafo berdasarkan sisi primer,

$$R_{e1} = R_1 + R_2' = R_1 + a^2 R_2 \quad (12)$$

- b. Reaktansi ekuivalen trafo berdasarkan sisi primer,

$$X_{e1} = X_1 + X_2' = X_1 + a^2 X_2 \quad (13)$$

- c. Impedansi ekuivalen trafo berdasarkan sisi primer,

$$Z_{e1} = R_{e1} + j X_{e1} \quad (14)$$

- d. Impedansi beban berdasarkan sisi primer,

$$Z_L' = R_L' + j X_L' = a^2 R_L + j a^2 X_L \quad (15)$$

- e. Arus primer,

$$I_1 = I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{(R_{e1} + a^2 R_L)^2 + (X_{e1} + a^2 X_L)^2}} \quad (16)$$

- f. Regulasi trafo berdasarkan sisi primer,

$$\text{Regulasi} = \frac{V_1 - V_2'}{V_1} \times 100\% \quad (17)$$

Sebaliknya bila parameter rangkaian trafo *dipindahkan* atau *berdasarkan* atau *dilihat dari sisi sekunder*, akan mengikuti persamaan berikut:

- a. Resistansi ekuivalen trafo berdasarkan sisi sekunder,

$$R_{e2} = R_1' + R_2 = \frac{R_1}{a^2} + R_2 \quad (18)$$

- b. Reaktansi ekivalen trafo berdasarkan sisi sekunder,

$$X_{e2} = X_1' + X_2 = \frac{X_1}{a^2} + X_2 \quad (19)$$

- c. Impedansi trafo berdasarkan sisi sekunder,

$$Z_{e2} = R_{e2} + j X_{e2} \quad (20)$$

- d. Tegangan masukan (input) berdasarkan sisi sekunder,

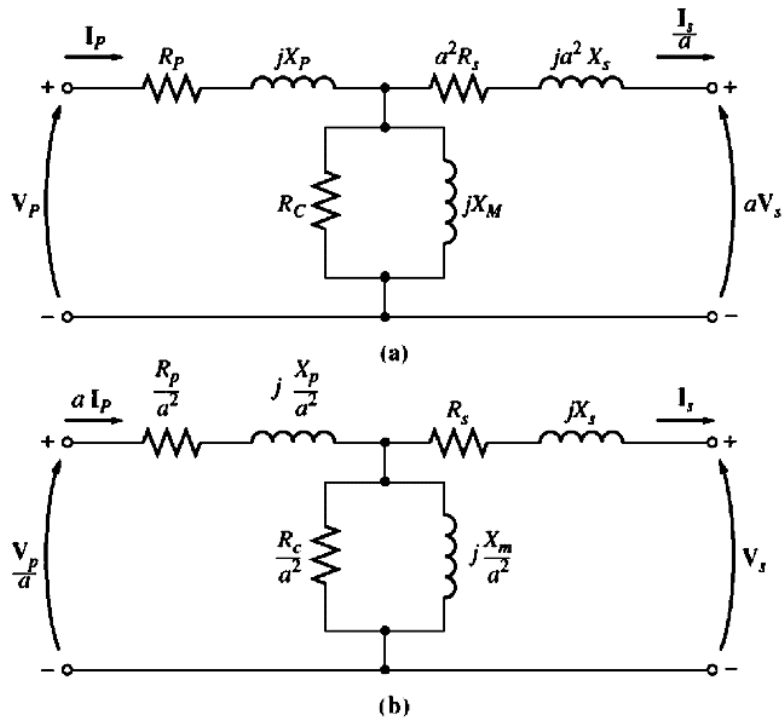
$$V_1' = \frac{V_1}{a} \quad (21)$$

- e. Arus masukan (input) berdasarkan sisi sekunder,

$$I_1' = I_2 = a I_1 \quad (22)$$

- f. Regulasi trafo berdasarkan sisi sekunder,

$$\text{Regulasi} = \frac{(V_1/a) - V_2}{V_2} \times 100\% \quad (23)$$



Gambar 7. 8. (a) Rangkaian ekivalen trafo mengacu pada sisi primer. (b) Rangkaian ekivalen trafo mengacu pada sisi sekunder.

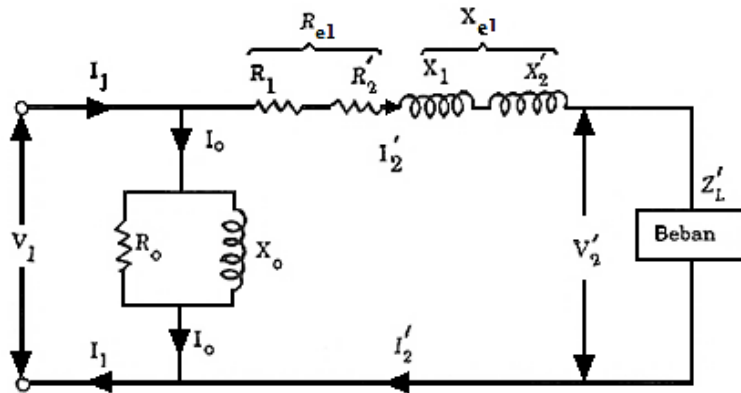
### Contoh Soal 3.

Suatu trafo 2300/230 V, 50 Hz mempunyai parameter:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,286 \text{ ohm} & X_1 &= 0,73 \text{ ohm} \\ R_2' &= 0,319 \text{ ohm} & X_2' &= 0,73 \text{ ohm} \\ R_o &= 250 \text{ ohm} & X_o &= 1250 \text{ ohm} \end{aligned}$$

Impedansi beban sekunder  $Z_L = (0,387 + j 0,29) \text{ ohm}$

Dengan menggunakan *rangkaian ekivalen pendekatan* seperti ditunjukkan pada Gambar 7.9.



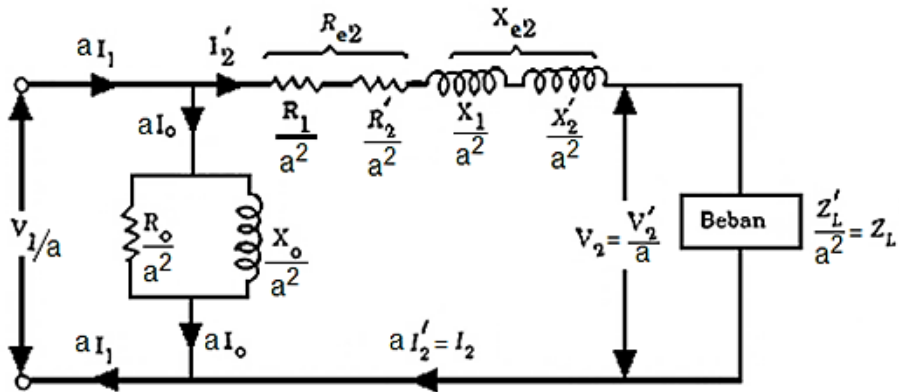
Gambar 7. 9. **Rangkaian ekivalen pendekatan** dari transformator ditinjau dari sisi primer.

Hitunglah bila *Ditinjau Dari Sisi Sekunder* :

- Arus primer
- Arus sekunder
- Arus beban nol
- Faktor daya input (masukan)
- Daya input (daya masukan)
- Daya output (daya keluaran)
- Rugi tembaga primer, sekunder, rugi inti dan efisiensi.

### Penyelesaian :

Karena perhitungan ditinjau dari sisi sekunder, maka semua parameter pada sisi primer perlu diubah menjadi parameter sisi sekunder.



Gambar 7. 10. Parameter sisi primer diubah menjadi parameter sisi sekunder

Rasio transformasi:

$$a = \frac{2300}{230} = 10$$

**Parameter sisi primer** sesuai Gambar 7.10. yang diubah menjadi parameter sisi sekunder yaitu:

$$R'_1 = \frac{R_1}{a^2} = \frac{0,286}{100} = 0,00286 \Omega; \quad R_2 = \frac{R'_2}{a} = \frac{0,319}{100} = 0,00319 \Omega;$$

$$X'_1 = \frac{X_1}{a^2} = \frac{0,73}{100} = 0,0073 \Omega; \quad X_2 = \frac{X'_2}{a^2} = \frac{0,73}{100} = 0,0073 \Omega;$$

$$R'_o = \frac{R_o}{a^2} = \frac{250}{100} = 2,5 \Omega; \quad X'_o = \frac{X_o}{a^2} = \frac{1250}{100} = 12,5 \Omega;$$

$$V'_1 = \frac{V_1}{a} = \frac{2300}{10} = 230 V ;$$

$$I'_1 = a I_1; \quad I'_o = a I_o; \quad I_2 = a I'_2 ;$$

Impedansi pada inti magnet pada transformator:

$$Y'_o = \frac{1}{R'_o} - \frac{j}{X'_o} = \frac{1}{2,5} - \frac{j}{12,5} = 0,4 - j0,08 = 0,408 \angle -11,3^\circ \text{ siemens}$$

$$Z'_o = \frac{1}{Y'_o} = \frac{1}{0,408 \angle -11,3^\circ} = 2,45 \angle 11,3^\circ \Omega = 2,4 + j0,48 \Omega$$

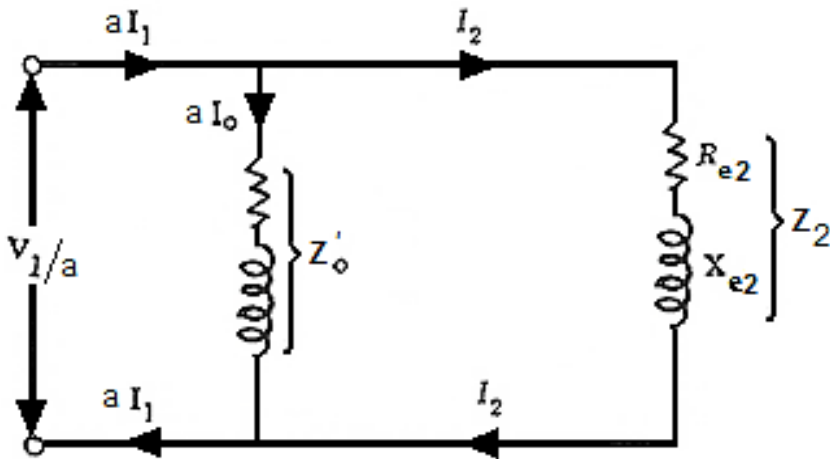
$$R_{e2} = R'_1 + R_2 = 0,00605 \Omega$$

$$X_{e2} = X'_1 + X_2 = 0,0146 \Omega$$

$$Z_{e2} = R_{e2} + jX_{e2} = 0,00605 + j0,0146 \Omega$$

$$Z_L = (0,387 + j0,29) \Omega = 0,4836 \angle 36,85^\circ \Omega$$

$$Z_2 = Z_L + Z_{e2} = 0,39305 + j0,3046 = 0,497 \angle 37,77^\circ \Omega$$



Gambar 7. 11. Rangkaian ekivalen pendekatan transformator setelah perhitungan  $Z_L + Z_{e2}$  dan diparalelkan dengan  $Z'_o$ .

$$Z'_o + Z_2 = (2,4 + j0,48) + (0,39305 + j0,3046)$$

$$Z'_o + Z_2 = 2,793 + j0,4946 = 2,836 \angle 10,04^\circ \Omega$$

$$\frac{1}{Z_{total}} = \frac{1}{Z'_o} + \frac{1}{Z_2} = \frac{Z'_o + Z_2}{Z'_o Z_2}$$

$$Z_{total} = \frac{Z'_o Z_2}{Z'_o + Z_2} = \frac{(2,45 \angle 11,3^\circ) (0,497 \angle 37,77^\circ)}{(2,836 \angle 10,04^\circ)}$$

$$Z_{total} = 0,429 \angle 39,03^\circ \Omega$$

$$Z_{total} = (0,333 + j0,27) \Omega$$

a) Arus primer:

$$I'_1 = \frac{V'_1}{Z_{total}} = \frac{230 \angle 0^\circ}{0,429 \angle 39,03^\circ} = 539,9 \angle -39,03^\circ \text{ Ampere}$$

b) Arus sekunder:

$$I_2 = I_1' \times \frac{Z_o'}{(Z_o' + Z_2)} = (539,9 \angle -39,03^\circ) \times \frac{2,45 \angle 11,3^\circ}{2,836 \angle 10,04^\circ}$$

$$I_2 = 466,41 \angle -37,77^\circ \text{ Ampere}$$

c) Arus beban nol:

$$I_o' = I_1' \times \frac{Z_2}{(Z_o' + Z_2)} = (539,9 \angle -39,03^\circ) \times \frac{0,497 \angle 37,77^\circ}{2,836 \angle 10,04^\circ}$$

$$I_o' = 94,61 \angle -11,3^\circ \text{ Ampere}$$

d) Faktor daya input (masukan) =  $\cos 39,03^\circ = 0,777$  lagging

e) Daya input (daya masukan):

$$P_{input} = V_1' I_1' \cos 39,03^\circ = (230)(539,9)(0,777) = 96,48 \text{ kW}$$

f) Daya output (keluaran):

$$P_{output} = I_2^2 R_L = (466,41)^2 (0,387) = 84,19 \text{ kW}$$

g) Rugi tembaga primer =  $(I_1')^2 R_1' = (539,9)^2 (0,00286) = 833,7 \text{ W}$

Rugi tembaga sekunder =  $I_2^2 R_2 = (466,41)^2 (0,00319) = 693,95 \text{ W}$

Rugi inti =  $(I_o')^2 R_o' = (94,61)^2 (2,4) = 21,48 \text{ kW}$

Efisiensi:

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \times 100\% = \frac{84,19}{96,48} \times 100\% = 87,26\%$$

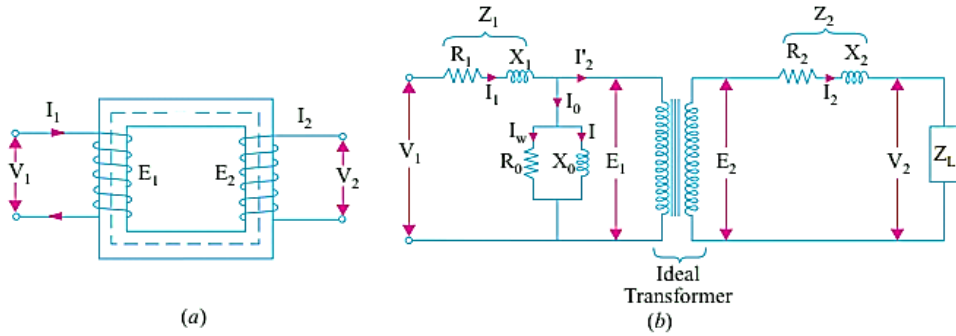
Tegangan pada sisi sekunder:

$$V_2 = I_2 Z_L = (466,41)(0,4836) = 225,55 \text{ volt}$$

Regulasi tegangan ditinjau dari sisi sekunder:

$$= \frac{V_1 - V_2}{V_2} \times 100\% = \frac{230 - 225,55}{225,55} \times 100\% = 1,97\%$$

Transformator yang ditunjukkan secara diagram pada Gambar 7.12(a) dapat diselesaikan menjadi rangkaian ekuivalen dimana resistansi dan reaktansi bocor transformator dibayangkan berada di luar belitan yang hanya berfungsi untuk mengubah tegangan (Gambar 7.12(b)).



Gambar 7. 12. Rangkaian ekuivalen transformator.

Arus tanpa beban  $I_0$  disimulasikan dengan induktansi murni  $X_0$  yang mengambil komponen magnetisasi  $I_\mu$  dan resistansi non-induktif  $R_0$  yang mengambil komponen kerja  $I_w$  yang dihubungkan secara paralel melintasi rangkaian primer.

Nilai  $E_1$  diperoleh dengan mengurangkan secara vektorial  $I_1 Z_1$  dari  $V_1$ . Nilai  $X_0 = E_1/I_0$  dan dari  $R_0 = E_1/I_w$ . Jelas bahwa  $E_1$  dan  $E_2$  terkait satu sama lain melalui pernyataan:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (24)$$

Untuk membuat perhitungan transformator lebih sederhana, lebih disukai untuk mentransfer tegangan, arus dan impedansi baik ke primer atau sekunder. Dalam hal ini, kami harus bekerja dalam satu belitan saja yang lebih nyaman. Setara primer dari tegangan induksi sekunder adalah  $E_2' = aE_2 = E_1$ .

Demikian pula, ekuivalen primer dari terminal sekunder atau tegangan output adalah  $V_2' = aV_2$ .

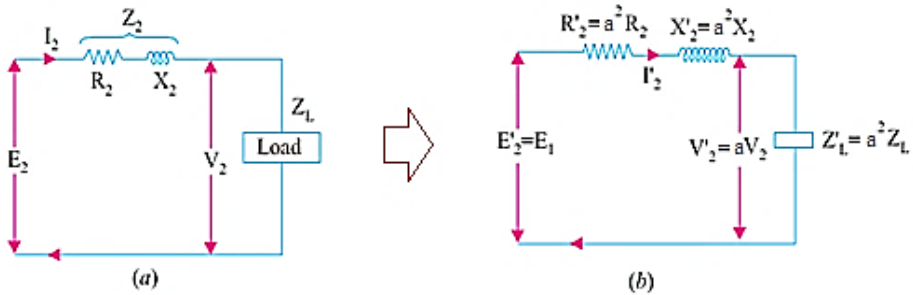
Setara primer dari arus sekunder adalah  $I_2' = I_2/a$ .

Untuk mentransfer impedansi sekunder ke primer digunakan  $a^2$ .

$$R_2' = a^2 R_2, \quad X_2' = a^2 X_2, \quad Z_2' = a^2 Z_2, \quad Z_L' = a^2 Z_L \quad (25)$$

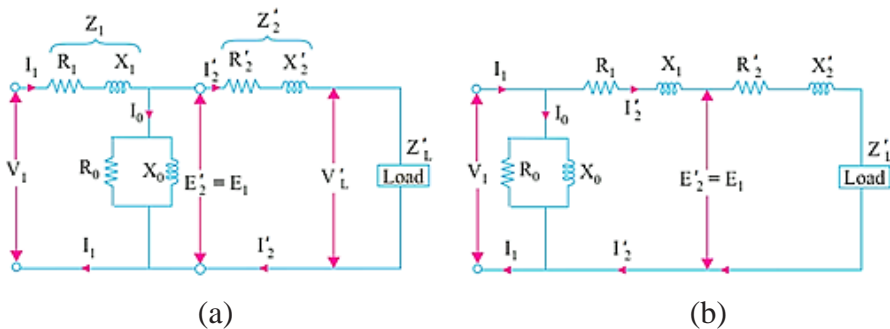
Hubungan yang sama digunakan untuk memindahkan impedansi beban eksternal ke primer.

Sirkuit sekunder ditunjukkan pada Gambar 7.13(a) dan nilai primer ekuivalennya ditunjukkan pada Gambar 7.13(b).



Gambar 7. 13. Rangkaian ekivalen transformator dilihat dari sisi sekunder.

Sirkuit ekivalen total transformator diperoleh dengan menambahkan impedansi primer seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.141(a). Ini dikenal sebagai rangkaian ekuivalen eksak tetapi ini menghadirkan masalah rangkaian yang agak lebih sulit untuk dipecahkan. Penyederhanaan dapat dilakukan dengan mentransfer sirkuit penggerak melintasi terminal seperti pada Gambar 7.14(b) atau Gambar 7.15(a). Perlu dicatat bahwa dalam kasus ini  $X_0 = V_1/I_\mu$ .



Gambar 7. 14. (a). Rangkaian ekivalen yang sebenarnya dari trafo, dan (b). Rangkaian ekivalen pendekatan dari trafo.

Penyederhanaan lebih lanjut dapat dicapai dengan menghilangkan  $I_0$  sama sekali seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.15(b). Dari Gambar 7.14 diketahui bahwa **impedansi total** antara terminal input adalah:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_m \parallel (\mathbf{Z}_2' + \mathbf{Z}_L') = \left( \mathbf{Z}_1 + \frac{\mathbf{Z}_m (\mathbf{Z}_2' + \mathbf{Z}_L')}{\mathbf{Z}_m + (\mathbf{Z}_2' + \mathbf{Z}_L')} \right) \quad (26)$$

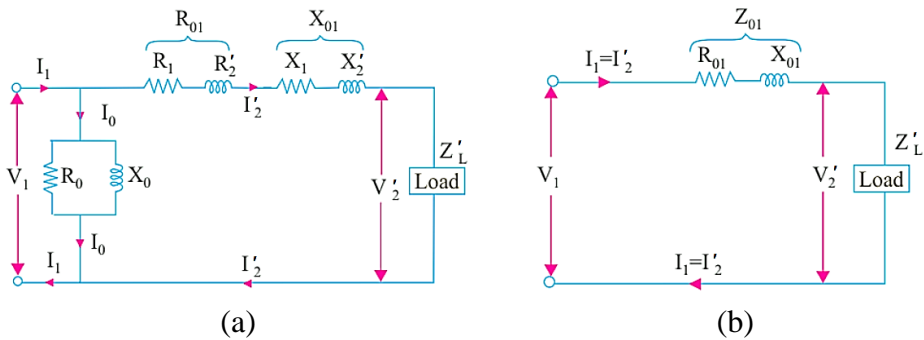
dimana:

$$\mathbf{Z}_2' = \mathbf{R}_2' + j \mathbf{X}_2' \quad (27)$$

dan  $\mathbf{Z}_m$  = impedansi rangkaian eksitasi.

Ini terjadi karena ada dua rangkaian paralel, yang satu memiliki impedansi  $\mathbf{Z}_m$  dan yang lainnya memiliki seri  $\mathbf{Z}_2'$  dan  $\mathbf{Z}_L'$  satu sama lain.

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{I}_1 \left[ \mathbf{Z}_1 + \frac{\mathbf{Z}_m (\mathbf{Z}_2' + \mathbf{Z}_L')}{\mathbf{Z}_m + (\mathbf{Z}_2' + \mathbf{Z}_L')} \right] \quad (28)$$



Gambar 7. 15. Rangkaian ekivalen trafo disederhanakan.

#### Contoh Soal 4.

Parameter transformator 2300/230 V, 50-Hz diberikan di bawah ini:

$$\begin{array}{lll} R_1 = 0,286 \Omega & R_2' = 0,319 \Omega & R_o = 250 \Omega \\ X_1 = 0,73 \Omega & X_2' = 0,73 \Omega & X_o = 1250 \Omega \end{array}$$

Impedansi beban sekunder  $Z_L = 0.387 + j 0.29$ . Selesaikan rangkaian ekuivalen yang tepat dengan tegangan normal di primer.

**Penyelesaian:**

$$a = \frac{2300}{230} = 10$$

$$\mathbf{Z}_L = 0.387 + j 0.29$$

$$\mathbf{Z}_L' = a^2 \mathbf{Z}_L = 100 (0.387 + j 0.29) = 38.7 + j 29 = 48.4 \angle 36.8^\circ \text{ ohm}$$

$$\mathbf{Z}_2' + \mathbf{Z}_L' = (38.7 + 0.319) + j(29 + 0.73) = 39.02 + j29.73 = 49.0 \angle 37.3^\circ \text{ ohm}$$

$$\mathbf{Y}_m = (0.004 - j 0.0008) \text{ mho};$$

$$\mathbf{Z}_m = 1/\mathbf{Y}_m = 240 + j48 = 245 \angle 11.3^\circ \text{ ohm}$$

$$\mathbf{Z}_m + (\mathbf{Z}_2' + \mathbf{Z}_L') = (240 + j48) + (39 + j29.7) = 279 \angle 15.6^\circ \text{ ohm}$$

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1 + \frac{Z_m(Z_2' + Z_L')}{Z_m + (Z_2' + Z_L')}} = \left[ \frac{2300 \angle 0^\circ}{0,286 + j0,73 + 41,4 \angle 33^\circ} \right]$$

$$= \frac{2300 \angle 0^\circ}{42 \angle 33,7^\circ} = 54,8 \angle -33,7^\circ \text{ Ampere}$$

$$I_2' = I_1 \times \frac{Z_m}{(Z_2' + Z_L') + Z_m} = 54,8 \angle -33,7^\circ \times \frac{245 \angle 11,3^\circ}{290 \angle 15,6^\circ}$$

$$= 54,8 \angle -33,7^\circ \times 0,845 \angle -4,3^\circ = 46,2 \angle -38^\circ \text{ A}$$

$$I_0 = I_1 \times \frac{(Z_2' + Z_L')}{(Z_2' + Z_L') + Z_m} = 54,8 \angle -33,7^\circ \times \frac{49 \angle 37,3^\circ}{290 \angle 15,6^\circ}$$

$$= 54,8 \angle -33,7^\circ \times 0,169 \angle 21,7^\circ = 9,26 \angle -12^\circ \text{ A}$$

Faktor daya masukan =  $\cos 33,7^\circ = 0.832$  lagging;

Daya input =  $V_1 I_1 \cos \phi_1 = 2300 \times 54.8 \times 0.832 = 105 \text{ kW}$ ;

Daya keluaran =  $(I_2')^2 R_L' = 46.2^2 \times 38.7 = 82.7 \text{ kW}$ ;

Rugi  $C_u$  primer =  $I_1^2 R_1 = 54.8^2 \times 0.286 = 860 \text{ W}$ ;

Rugi  $C_u$  sekunder =  $(I_2')^2 R_2' = 46.2^2 \times 0.319 = 680 \text{ W}$ ;

Rugi inti =  $I_0^2 R_m = 9.26^2 \times 240 = 20.6 \text{ kW}$ ;

$\eta = (82.7/105) \times 100 = 78.8\%$ ;

$V_2' = I_2' Z_L' = 46.2 \times 48.4 = 2.240 \text{ V}$ ;

$\text{Regulasi} = \frac{V_1 - V_2'}{V_1} = \frac{2300 - 2240}{2300} \times 100\% = 2,6\%$

## 7.5 Pengujian Transformator

Maksud dan tujuan pengujian transformator adalah untuk mengetahui watak kerja trafo, dengan memperhitungkan empat parameter utama yakni:

1. Resistansi ekuivalen berdasarkan primer ( $R_{e1}$ ) atau berdasarkan sekunder ( $R_{e2}$ ).
2. Reaktansi bocor ekuivalen berdasarkan primer ( $X_{e1}$ ) atau berdasarkan sekunder ( $X_{e2}$ ).

3. Konduktansi rugi inti  $G_o$  (kebalikan  $R_o$ ).
4. Suseptansi magnetisasi  $B_o$  (kebalikan reaktansi  $X_o$ ).

Keempat paramter tersebut dengan mudah ditentukan melalui dua macam pengujian yaitu:

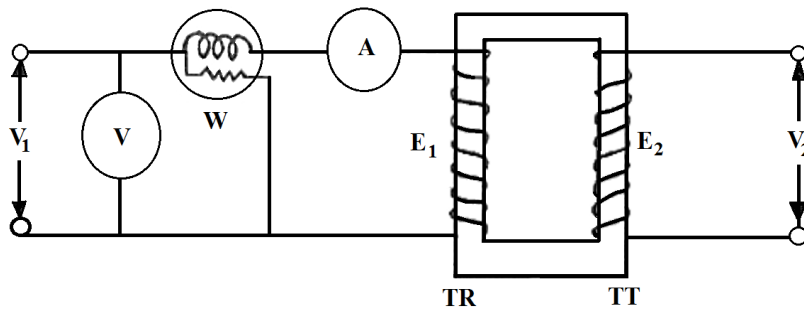
1. Pengujian beban nol (*open circuit, OC*)
2. Pengujian hubung singkat (*short circuit, SC*).

### 7.5.1 Pengujian Beban Nol

#### a. Maksud dan tujuan pengujian:

1. Menentukan rugi beban nol atau rugi inti.
2. Menentukan harga  $X_o$  dan  $R_o$ .

#### b. Rangkaian Pengujian.



Gambar 7. 16. Rangkaian pengujian beban nol dari trafo.

*Daya input beban nol* ( $W_o$ ) yang dibaca pada *Wattmeter* adalah sebagai berikut,

$$W_o = V_1 I_o \cos \phi_o \rightarrow \cos \phi_o = \frac{W_o}{V_1 I_o} \quad (29)$$

$$I_\mu = I_o \sin \phi_o \quad ; \quad I_\omega = I_o \cos \phi_o \quad (30)$$

$$X_o = \frac{V_1}{I_\mu} \quad ; \quad R_o = \frac{V_1}{I_\omega} \quad (31)$$

Arus beban nol ( $I_o$ ) amat kecil jika dibandingkan dengan arus beban penuh primer, hanya sekitar 2% sampai 3%. Oleh karena itu rugi

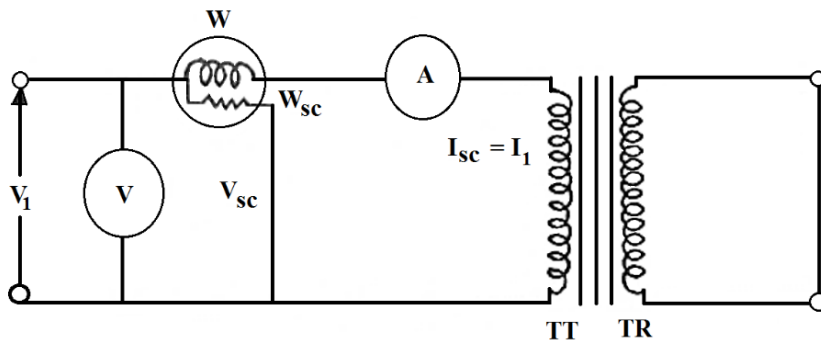
tembaga primer dapat diabaikan, sehingga secara praktis, daya input beban nol ( $W_o$ ) digunakan untuk mengatasi rugi-rugi inti.

### 7.5.2 Pengujian Hubung Singkat

#### a. Maksud dan tujuan pengujian:

1. Menentukan impedansi ekivalen  $Z_{e1}$  dan  $Z_{e2}$ , reaktansi bocor ekivalen  $X_{e1}$  dan  $X_{e2}$  dan reaktansi total trafo berdasarkan belitan dimana alat-alat ukur dipasang. Dengan diketahuinya  $Z_{e1}$  dan  $Z_{e2}$  maka jatuh tegangan total dalam trafo berdasarkan sisi primer atau sisi sekunder dapat dihitung sehingga regulasi trafo dapat ditentukan.
2. Menentukan rugi tembaga pada waktu beban penuh (pada sembarang beban). Rugi ini dapat digunakan untuk menghitung efisiensi trafo.

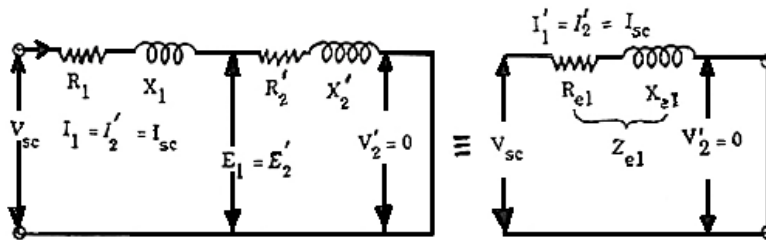
#### b. Rangkaian Pengujian.



Gambar 7. 17. Rangkaian pengujian hubung singkat trafo.

Pemberian tegangan pada sisi  $TT$  hanya berkisar antara 5 sampai 10% dari tegangan nominal, maka fluks yang terjadi pada inti juga hanya sekitar 5% sampai 10% dari fluks nominalnya, sehingga rugi inti sangat kecil dan daya input yang terbaca pada *Wattmeter* merupakan rugi tembaga.

Rangkaian ekivalen trafo pada *kondisi hubung singkat* seperti diperlihatkan pada Gambar 7.18.



Gambar 7. 18. Untai ekivalen trafo dalam keadaan hubung singkat.

Jika  $V_{sc}$  adalah tegangan yang dibutuhkan untuk mendapatkan arus beban penuh pada waktu hubung singkat maka:

$$Z_{e1} = \frac{V_{sc}}{I_1} \quad (32)$$

dimana:  $Z_{e1} = R_{e1} + jX_{e1}$  dan  $Z_{e1} = \sqrt{R_{e1}^2 + X_{e1}^2} \angle \tan^{-1}(X_{e1}/R_{e1})$

$$W_{sc} = I_1^2 R_{e1} \rightarrow R_{e1} = \frac{W_{sc}}{I_1^2} \quad (33)$$

$$X_{e1} = \sqrt{Z_{e1}^2 - R_{e1}^2} \quad (34)$$

### Contoh Soal 5.

Suatu trafo 1-fasa 200/400 volt, 50 Hz, untai ekivalennya didapatkan dari data pengujian berikut:

**Pengujian beban nol:** 200 volt; 0,7 amper; 70 watt, pada sisi TR.

**Pengujian hubung singkat:** 15 volt; 10 amper; 85 watt, pada sisi TT.

### Hitunglah:

Tegangan sekunder bila melayani beban 5 kW pada faktor daya 0,8 mengikuti dan tegangan primer 200 volt.

### Penyelesaian:

Dari *pengujian beban nol*:

$$W_o = V_1 I_o \cos \phi_o$$

$$70 = 200 \times 0,7 \times \cos \phi_o \Leftrightarrow \cos \phi_o = \frac{70}{200 \times 0,7} = 0,5$$

$$\sin \phi_o = \sqrt{1^2 - 0,5^2} = \sqrt{0,75} = 0,866$$

(Ingat,  $\sin^2 \phi_o + \cos^2 \phi_o = 1$ )

$$I_{\mu} = I_o \sin \phi_o = 0,7 \times 0,866 = 0,606 \text{ amper}$$

$$I_{\omega} = I_o \cos \phi_o = 0,7 \times 0,5 = 0,35 \text{ amper}$$

$$X_o = \frac{V_1}{I_{\mu}} = \frac{200}{0,606} = 330 \text{ ohm}$$

$$R_o = \frac{V_1}{I_{\omega}} = \frac{200}{0,35} = 571,4 \text{ ohm}$$

Dari *pengujian hubung singkat* :

Dalam pengujian ini, *alat-alat ukur ditempatkan pada sisi sekunder* yaitu **pada sisi Tegangan Tinggi (TT)** dan belitan sisi tegangan rendah (TR) atau primer dihubung-singkat, sehingga diperoleh:

$$Z_{e2} = \frac{V_{sc}}{I_2} = \frac{15 \text{ V}}{10 \text{ A}} = 1,5 \text{ ohm}$$

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{200}{400} = 0,5$$

Karena sisi primer dihubung singkat, maka:

$$Z_{e1} = a^2 Z_{e2} = (0,5)^2 \times 1,5 = 0,375 \text{ ohm}$$

$$W_{sc} = I_2'^2 R_{e2} \Leftrightarrow R_{e2} = \frac{W_{sc}}{I_2'^2} = \frac{85}{100} = 0,85 \text{ ohm}$$

$$R_{e1} = a^2 R_{e2} = (0,5)^2 \times 0,85 = 0,21 \text{ ohm}$$

$$X_{e1} = \sqrt{Z_{e1}^2 - R_{e1}^2} = \sqrt{0,375^2 - 0,21^2} = 0,31 \text{ ohm}$$

$$\text{Output dalam kVA} = \frac{P}{\cos \phi} = \frac{5}{0,8} = 6,25$$

$$\text{Arus output } I_2 = \frac{5.000}{0,8 \times 400} = 15,6 \text{ amper}$$

$$Z_{e2} = 1,5 \text{ ohm}$$

$$R_{e2} = 0,85 \text{ ohm}$$

$$X_{e2} = \sqrt{Z_{e2}^2 - R_{e2}^2} = \sqrt{1,5^2 - 0,85^2} = 1,24 \text{ ohm}$$

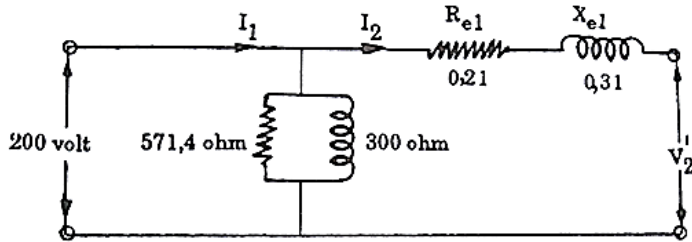
Jatuh tegangan total berdasarkan sisi sekunder:

$$= I_2 (R_{e2} \cos \phi_2 + X_{e2} \sin \phi_2)$$

$$= 15,6 ((0,85)(0,8) + (1,24)(0,6)) = 22,4 \text{ volt}$$

$$V_2 = 400 - 22,4 = 377,8 \text{ volt}$$

Dari pengujian beban nol dan hubung singkat tersebut didapatkan parameter trafo, sehingga untai ekivalen pendekatan dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 7. 19. Rangkaian ekivalen trafo dari hasil pengujian beban nol dan hubung singkat.

## 7.6 Efisiensi Transformator

Efisiensi dari setiap peralatan dalam bidang teknik adalah daya keluaran dibagi dengan daya masukan (input), dapat dinyatakan dalam persen (%) atau dengan persamaan:

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{\text{Daya keluaran}}{\text{Daya masukan}} \times 100\% \quad (35)$$

Dari *pengujian beban nol* dan *pengujian hubung singkat* didapatkan *rugi total pada trafo* sehingga:

$$\text{Daya masukan} = \text{Daya keluaran} + \sum \text{Rugi} \quad (36)$$

Dengan demikian, *efisiensi trafo* berdasarkan rugi-rugi yang ada :

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{\text{Daya masukan} - \sum \text{Rugi}}{\text{Daya masukan}} \times 100\% \quad (37)$$

atau,

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \left[ 1 - \frac{\sum \text{Rugi}}{\text{Daya masukan}} \right] \times 100\% \quad (38)$$

atau,

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{\text{Daya keluaran}}{\text{Daya keluaran} + \sum \text{Rugi}} \times 100\% \quad (39)$$

Daya keluaran trafo dalam besaran Watt,

$$P_{\text{output}} = V_2 I_2 \cos \phi_2$$

Rugi-rugi trafo :

- Rugi inti**  $P_c = W_o$  dari pengujian beban nol.
- Rugi tembaga**  $= I_2^2 R_{e2}$  dari pengujian hubung singkat.

Berdasarkan daya keluaran dan rugi-rugi maka *Efisiensi trafo*:

$$\eta \% = \frac{V_2 I_2 \cos \phi_2}{V_2 I_2 \cos \phi_2 + P_c + I_2^2 R_{e2}} \times 100\% \quad (40)$$

Pada trafo yang komersial dikenal *efisiensi sepanjang hari* atau *efisiensi operasional selama 24 jam* dengan persamaan :

$$\eta \text{ all - day} = \frac{\text{Energi keluaran dalam kWh}}{\text{Energi masukan dalam kWh}} \quad (41)$$

### Contoh Soal 6.

Suatu trafo 1-fase 25 kVA; 2200/220 volt mempunyai resistansi primer 1,0 ohm dan resistansi sekunder 0,01 ohm. Hitunglah efisiensi pada waktu beban penuh dengan faktor daya 0,8, jika rugi inti dari trafo sama dengan 80% dari rugi tembaga pada waktu beban penuh.

**Penyelesaian:**

$$a = \frac{2200}{220} = 10; \quad R_{e2} = R_2 + \frac{R_1}{a^2} = 0,01 + \frac{1}{100} = 0,02 \text{ ohm}$$

Arus beban penuh sekunder,

$$I_2 = \frac{25000}{220} = 113,6 \text{ Amper}$$

Rugi tembaga pada waktu beban penuh,

$$P_{cu} = I_2^2 R_{e2} = (113,6)^2 \times 0,02 = 258 \text{ watt}$$

Rugi inti  $P_c = 80\% \times 258 = 206,4 \text{ watt}$

Rugi total  $= P_{cu} + P_c = 258 + 206,4 = 464,4 \text{ watt}$

Daya output  $= P_{\text{output}} = V_2 I_2 \cos \phi_2 = 25 \times 0,8 \text{ kW} = 20.000 \text{ watt}$

$$\text{Efisiensi, } \eta (\%) = \frac{20.000}{(20.000 + 464,4)} \times 100\% = 97,7\%$$

### Contoh Soal 7.

Suatu trafo 1-fase, 5 kVA mempunyai rugi inti  $P_c = 35$  watt dan rugi tembaga  $P_{cu} = 40$  watt pada waktu beban penuh. Trafo bekerja dengan takaran KVA penuh dan faktor daya 0,8 mengikuti untuk 6 jam, kemudian bekerja dengan setengah takaran kVA untuk 12 jam pada faktor daya 0,5 mengikuti, selanjutnya tidak berbeban selama 6 jam.

#### Penyelesaian:

Rugi tembaga pada beban penuh = 40 watt

Rugi tembaga  $\frac{1}{2}$  beban penuh =  $(0,5)^2 \times 40 = 10$  watt

Rugi tembaga beban penuh selama 6 jam =  $6 \times 40 = 240$  watthour

Rugi tembaga  $\frac{1}{2}$  beban penuh selama 12 jam =  $12 \times 10 = 120$  watthour = 1,2 kWh

Rugi tembaga total selama 24 jam =  $240 + 120 = 360$  watthour = 0,36 kWh

Rugi inti selama 24 jam =  $24 \times 35 = 840$  Wh = 0,84 kWh

Rugi total selama 24 jam =  $0,36 + 0,84 = 1,2$  kWh

Energi keluaran selama 24 jam

=  $(6 \times \text{daya keluaran pada waktu beban penuh}) + (12 \times \frac{1}{2} \text{ daya keluaran beban penuh})$

=  $(6 \times \text{kVA} \times pf_{FL}) + (12 \times \frac{1}{2} \text{kVA} \times pf_{\frac{1}{2}FL})$

=  $(6 \times 5 \times 0,8) + (12 \times 2,5 \times 0,5)$

= 39 kWh.

Efisiensi sepanjang hari:

$$\eta_{all-day} = \frac{39}{39 + 1,2} \times 100\% = 97\%$$

## 7.7 Soal Latihan

1. Suatu trafo 30 kVA, 2400/120 volt, 50 Hz mempunyai parameter:

$$R_1 = 0,1 \text{ ohm}$$

$$X_1 = 0,22 \text{ ohm}$$

$$R_2 = 0,035 \text{ ohm}$$

$$X_2 = 0,012 \text{ ohm}$$

Hitunglah:

- a. Arus primer dan arus sekunder bila berbeban penuh.
  - b. Impedansi belitan primer dan sekunder.
  - c. Jatuh tegangan pada belitan primer dan sekunder.
  - d. Transformasi,  $emf$  pada primer dan sekunder.
2. Suatu trafo 2300/230 volt, 50 Hz mempunyai parameter:
- $$R_1 = 0,286 \text{ ohm} \quad X_1 = 0,73 \text{ ohm} \quad R_o = 250 \text{ ohm}$$
- $$R_2' = 0,319 \text{ ohm} \quad X_2' = 0,73 \text{ ohm} \quad X_o = 1250 \text{ ohm}$$

Impedansi beban sekunder  $Z_L = (0,387 + j0,29) \text{ ohm}$

Gunakan rangkaian ekivalen pendekatan untuk menghitung:

Hitunglah:

- a. Arus primer, arus sekunder dan arus beban nol.
  - b. Faktor daya input, daya input dan daya output.
  - c. Rugi tembaga primer, rugi tembaga sekunder, rugi inti dan efisiensi
  - d. Regulasi berdasarkan sisi primer maupun sisi sekunder.
3. Suatu trafo, 1-fasa, 2300/230 volt, 15 kVA, dengan data pengujian hubung singkat: 45,7 volt; 6,52 Amper; 170 watt; meter-meter di sisi  $TT$ . Hitunglah:
- a. Resistansi, reaktansi dan impedansi ekivalens berdasarkan sisi tegangan tinggi maupun sisi tegangan rendah.
  - b. Regulasi berdasarkan sisi tegangan rendah untuk faktor daya 0,773 *lagging*.

**[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]**

## **BAB 8**

# **MESIN INDUKSI / TAK SEREMPAK KONSTRUKSI DAN PRINSIP KERJA**

### **8.1 Pendahuluan**

**Mesin listrik baik arus searah maupun bolak-balik terdiri dari generator dan motor** sehingga untuk mesin tak serempak ini dapat dibagi atas:

1. **Generator Tak Serempak**, sebagai pembangkit tenaga listrik, akan tetapi jarang digunakan, kadang-kadang digunakan dalam pengereman regeneratif yakni bila motor tak serempak berputar melebihi kecepatan sinkronnya maka secara otomatis bekerja sebagai generator dan berlangsung proses pengereman.
2. **Motor Tak Serempak (motor asinkron atau motor induksi)** yang banyak digunakan di pabrik, industri dan peralatan-peralatan rumah tangga sebagai penggerak atau penghasil tenaga mekanis.

### **8.2 Mesin Tak Serempak (Mesin Induksi)**

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik (ac) yang paling luas digunakan. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke rotornya, dimana arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan **medan putar stator** (*rmf, rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator. Motor induksi sangat banyak digunakan di dalam kehidupan sehari-hari baik di industri maupun di rumah tangga. Hal ini disebabkan karena motor induksi memiliki berbagai keunggulan dibanding dengan motor listrik yang lain, yaitu diantaranya karena harganya yang relatif murah, konstruksinya yang sederhana dan kuat serta karakteristik kerja yang baik.

Motor induksi yang umum dipakai adalah motor induksi 3-fase dan motor induksi 1-fase. Motor induksi 3-fase dioperasikan pada sistem tenaga 3-fase dan banyak digunakan di dalam berbagai bidang industri dengan kapasitas yang besar. Motor induksi 1-fase dioperasikan pada sistem tenaga

1-fase dan banyak digunakan terutama untuk peralatan rumah tangga seperti kipas angin, lemari es, pompa air, mesin cuci dan sebagainya karena motor induksi 1-fase mempunyai daya keluaran yang rendah.



Gambar 8. 1. Stator dan rotor motor induksi.

**Motor induksi** dapat dibagi atas:

- 1. Berdasarkan prinsip kerja:**
  - a. Motor induksi rotor sangkar dan motor induksi rotor belitan.
  - b. Motor komutator seri, kompensasi, shunt dan repulsion.
- 2. Berdasarkan arus dan tegangan:**
  - a. Tiga fasa.
  - b. Satu fasa.
- 3. Berdasarkan kecepatan:**
  - a. Bervariasi.
  - b. Bisa diatur.
- 4. Berdasarkan struktur:**
  - a. Terbuka
  - b. Tertutup
  - c. Setengah tertutup
  - d. Berventilasi.

### **8.3 Konstruksi Motor Induksi**

**Konstruksi motor induksi** terdiri dari:

1. **Stator**, bagian motor yang diam.
2. **Rotor**, bagian motor yang berputar.

3. **Celah udara**, adalah ruangan antara slot dan rotor.

**Konstruksi stator** terdiri dari:

- a. **Rumah stator**, terbuat dari besi tuang.
- b. **Inti stator**, terbuat dari besi lunak atau baja silikon.
- c. **Alur dan gigi**, materialnya sama dengan inti, alur tempat meletakkan belitan.
- d. **Belitan stator**, terbuat dari tembaga.

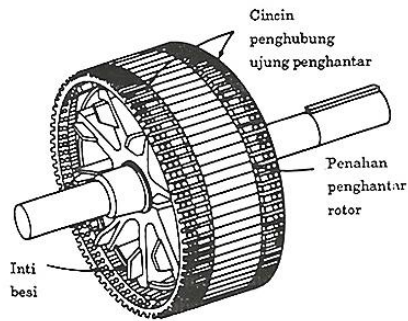
Belitan stator dirangkai untuk motor induksi 3 fasa tetapi juga dapat dirangkai untuk motor induksi 1 fasa, disamping itu juga dirangkai untuk jumlah kutub tertentu.



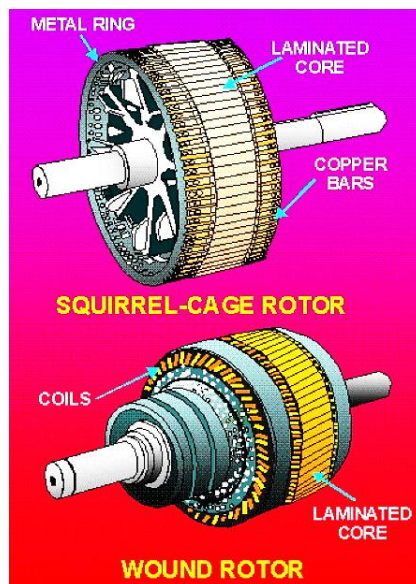
Gambar 8. 2. Konstruksi stator dengan alur kumparan.

**Konstruksi rotor**, terdiri dari:

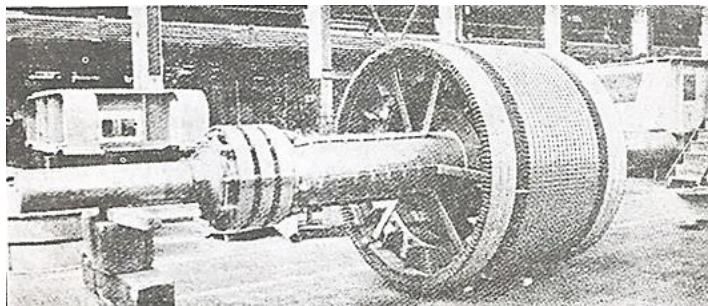
- a. **Inti rotor**, bahannya sama dengan inti stator.
- b. **Alur dan gigi**, materialnya sama dengan inti, alur tempat meletakkan belitan.
- c. **Belitan rotor**, bahannya dari tembaga, dari konstruksi lilitan akan memberikan **dua macam rotor** yakni:
  - i. **Motor induksi dengan rotor sangkar atau rotor kurung.**
  - ii. **Motor induksi dengan rotor belitan.**
- d. **Poros atau as.**



Gambar 8. 3. Rotor sangkar dari motor induksi.

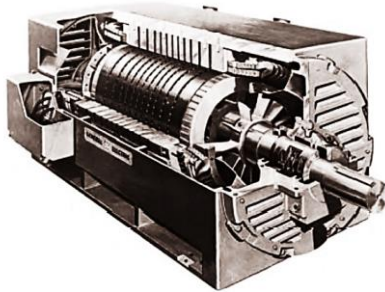


Gambar 8. 4. Jenis rotor sangkar (atas) dan rotor belitan (bawah).

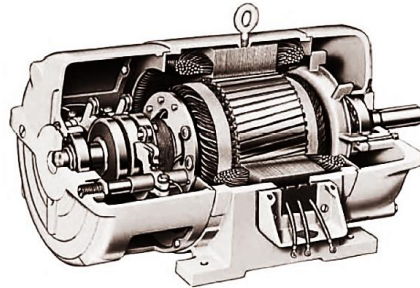


Gambar 8. 5. Rotor belitan dari motor induksi.

**Stator** dan **rotor** membentuk rangkaian magnetis, berbentuk silindris yang simetris dan diantaranya terdapat celah udara. **Celah udara antara stator dan rotor**, kalau **terlalu luas** maka *efisiensi mesin rendah*, sebaliknya **jika terlalu sempit** menimbulkan **kesukaran mekanis pada mesin**.



(a). Motor induksi rotor sangkar (*cage rotor*)



(b). Motor induksi rotor belitan (*wound rotor*), terlihat rotor dan cincin geser.

Gambar 8. 6. Motor induksi berdasarkan jenis rotor.



Gambar 8. 7. Motor induksi 3 fasa.

#### 8.4 Prinsip Kerja Motor Induksi

Prinsip kerja motor induksi tiga fasa berdasarkan induksi elektromagnetis, yakni **bila belitan/kumparan stator diberi sumber tegangan bolak-balik 3 fasa**, maka arus akan mengalir pada kumparan tersebut, menimbulkan medan putar (**garis-garis gaya fluks**) yang **berputar dengan kecepatan sinkron** dan akan mengikuti persamaan:

$$N_s = \frac{120 f}{p} \text{ rpm} \quad (1)$$

dengan:

$N_s$  = kecepatan putar dari medan stator dalam rpm.

$f$  = frekuensi arus dan tegangan stator.

$p$  = banyaknya kutub

**Garis-garis gaya fluks dari stator tersebut yang berputar, akan memotong penghantar-penghantar rotor sehingga pada penghantar-penghantar tersebut timbul EMF (elektro motoris force) atau GGL (gaya gerak listrik) atau tegangan induksi.**

**Berhubung kumparan rotor merupakan rangkaian yang tertutup maka pada kumparan tersebut mengalir arus. Arus yang mengalir pada penghantar rotor yang berada dalam medan magnet berputar dari stator, maka pada penghantar rotor tersebut timbul gaya-gaya yang berpasangan dan berlawanan arah, gaya tersebut menimbulkan torsi yang cenderung memutar rotornya, rotor akan berputar dengan kecepatan putar ( $N_r$ ) mengikuti putaran medan putar stator ( $N_s$ ).**

## 8.5 Slip (S)

**Slip timbul karena perbedaan perputaran medan putar stator dan perputaran rotor.** Ada 3 macam slip, yaitu:

1. **Slip mutlak**, dinyatakan oleh persamaan:

$$S = N_s - N_r \quad (2)$$

2. **Slip pecahan**, dinyatakan oleh persamaan:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (3)$$

3. **Slip dalam persen (%)**, dinyatakan oleh persamaan:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 \quad (4)$$

## 8.6 Frekuensi Arus Rotor

**Pada waktu rotor masih diam, maka frekuensi arus rotor sama dengan frekuensi arus stator ( $f$ ).** Waktu rotor berputar, maka frekuensinya  $f'$  akan dipengaruhi oleh slip yang mengikuti persamaan:

$$f' = S \cdot f \quad (5)$$

### Contoh Soal 1.

Motor induksi 3 fasa, 4 kutub bekerja dengan sumber tegangan yang frekuensinya 50 Hz. Hitunglah:

- Kecepatan medan putar stator.
- Kecepatan rotor jika slip 0,04.
- Frekuensi arus rotor jika slip 0,03.
- Frekuensi rotor pada waktu diam.

### Penyelesaian:

- $$N_s = \frac{120 f}{p} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ rpm}$$
- $$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \rightarrow 0,04 = \frac{1500 - N_r}{1500} \rightarrow N_r = 1440 \text{ rpm}$$
- $$f' = S \cdot f = 0,03 \times 50 = 1,5 \text{ rps} = 90 \text{ rpm}$$
- Pada waktu diam  $S = 1$ , maka  $f = 50 \text{ cps} = 50 \text{ Hz}$

### Contoh Soal 2.

Motor induksi 3 fasa, 6 kutub 440 volt, 50 Hz bekerja dengan beban penuh pada kecepatan 950 rpm. Hitunglah:

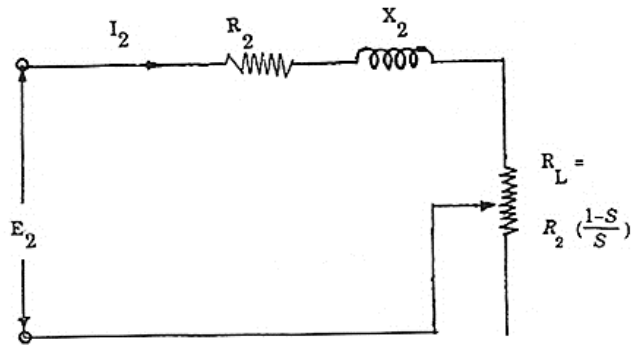
- Slip
- Frekuensi arus dan tegangan rotor.

### Penyelesaian:

- $$N_s = \frac{120 f}{p} = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ rpm}$$
$$N_r = 950 \text{ rpm}$$
$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0,05 \text{ atau } 5\%$$
- $$f' = S \cdot f = 0,05 \times 50 = 2,5 \text{ Hz}$$

## 8.7 Rangkaian Rotor Motor Induksi

*Belitan/kumparan rotor* kalau digambarkan secara rangkaian listrik, seperti diperlihatkan pada Gambar 8.8.



Gambar 8. 8. Rangkaian rotor motor induksi.

Keterangan Gambar 8.8:

- $R_2$  = Resistansi/tahanan/hambatan dari kumparan **rotor** dalam ohm ( $\Omega$ ) per fase.
- $X_2$  = Reaktansi kumparan **rotor pada waktu masih diam** dalam ohm ( $\Omega$ ) per fase.
- $R_2 \left( \frac{1-S}{S} \right)$  = simulasi beban dari motor induksi.
- $I_2$  = Arus yang mengalir di kumparan rotor dari induksi.
- $E_2$  = **EMF (GGL) atau tegangan induksi yang dibangkitkan oleh kumparan rotor, pada waktu rotor masih dalam keadaan diam, dalam besaran volt.**

**Pada waktu rotor berputar** maka **EMF (GGL) atau tegangan induksi** pada kumparan rotor diberi simbol dengan  $E_{2s}$  yang mengikuti persamaan:

$$E_{2s} = S E_2 \quad (6)$$

Demikian pula dengan **reaktansinya** pada **waktu rotor berputar**, diberi simbol dengan  $X_{2s}$  dan akan mengikuti persamaan:

$$X_{2s} = S X_2 \quad (7)$$

**Pada saat rotor berputar, maka arus rotor:**

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{(R_2)^2 + (X_{2s})^2}} = \frac{S E_2}{\sqrt{(R_2)^2 + (S X_2)^2}}$$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2/S)^2 + (X_2)^2}} \quad (8)$$

Dari rangkaian rotor tersebut dapat dituliskan:

$$\frac{R_2}{S} = R_2 + R_2 \left[ \frac{1-S}{S} \right]$$

Persamaan tersebut dikalikan dengan  $I_2^2$ , menghasilkan:

$$I_2^2 \frac{R_2}{S} = I_2^2 R_2 + I_2^2 R_2 \left[ \frac{1-S}{S} \right] \quad (9)$$

dengan:

1.  $I_2^2 \frac{R_2}{S}$  = Daya yang diterima rotor ( $P_2$ ), atau daya input rotor (*daya masuk rotor*) atau daya yang ditarik oleh rotor.
2.  $I_2^2 R_2$  = Rugi-rugi tembaga rotor atau daya yang hilang berupa panas ( $P_{Cu_r}$ ).
3.  $I_2^2 R_2 \left[ \frac{1-S}{S} \right]$  = Daya keluaran (output) rotor berupa daya mekanik ( $P_m$ ) atau daya output rotor yang masih kotor (*gross output*).

Dari butir 1, 2 dan 3 didapatkan bahwa:

$$\text{Rugi tembaga rotor } [P_{Cu_r}] = S \times [\text{Daya masuk rotor } (P_2)] \quad (10)$$

$$\text{Daya mekanik } P_m = (1 - S) \times \text{daya masuk rotor } (P_2) \quad (11)$$

$$P_2 : P_m : P_{Cu_r} = 1 : (1 - S) : S \quad (12)$$

### Contoh Soal 3.

Motor induksi 3 fasa rotor kurung, 4 kutub 60 Hz sedang bekerja pada kecepatan 1710 rpm. Rugi tembaga rotor 6 kW/fasa.

Hitunglah:

- a. Daya masuk rotor.
- b. Frekuensi arus rotor.

### Penyelesaian:

$$a. N_s = \frac{120 f}{p} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

$$N_r = 1710 \text{ rpm}$$

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1800 - 1710}{1800} = 0,05 \text{ atau } 5\%$$

$$\text{Daya masuk rotor} = \frac{\text{Rugi tembaga rotor}}{S} = \frac{6 \text{ kW/fase}}{0,05} = 120 \text{ kW/fase}$$

b. Frekuensi arus rotor:

$$f' = f_2 = S \cdot f_1 = 0,05 \times 60 \text{ Hz} = 3 \text{ Hz} = 3 \text{ rps} = 3 \text{ cps}$$

## 8.8 Soal Latihan

### 8.8.1 Soal Teori Motor Induksi

1. Jelaskan apa sebabnya motor tak serempak yang banyak digunakan baik di industri maupun di pabrik. Jelaskan, generator tak serempak digunakan dimana dan prinsip kerja generator tak serempak.
2. Jelaskan konstruksi motor induksi?
3. Jelaskan klasifikasi motor induksi?
4. Jelaskan prinsip kerja motor induksi?
5. Mengapa kecepatan motor tidak sama dengan kecepatan medan putar statornya? Jelaskan.

### 8.8.2 Soal Perhitungan Motor Induksi

1. Motor induksi 3 fasa, 8 kutub, bekerja dengan sumber tegangan yang frekuensinya 50 Hz. Hitunglah:
  - a. Kecepatan medan putar stator.
  - b. Kecepatan motor bila slip 3%.
  - c. Kecepatan motor bila frekuensi emf rotor 3 Hz.
2. Motor induksi 3 fasa, 4 kutub, 60 Hz, dalam keadaan bekerja rotornya menarik daya 120 kW/fasa. Frekuensi arus rotornya 3 Hz. Hitunglah:
  - a. Kecepatan motor.
  - b. Rugi tembaga rotor.

# BAB 9

## MESIN INDUKSI / TAK SEREMPAK

### RANGKAIAN EKIVALEN DAN PENGATURAN

#### 9.1 Pendahuluan

Motor tak serempak (motor asinkron atau motor induksi) yang banyak digunakan di pabrik, industri dan peralatan-peralatan rumah tangga sebagai penggerak atau penghasil tenaga mekanis. Oleh karena itu, dalam bagian ini akan dibahas mengenai rangkaian ekivalen motor induksi hingga pengujian pada motor induksi.

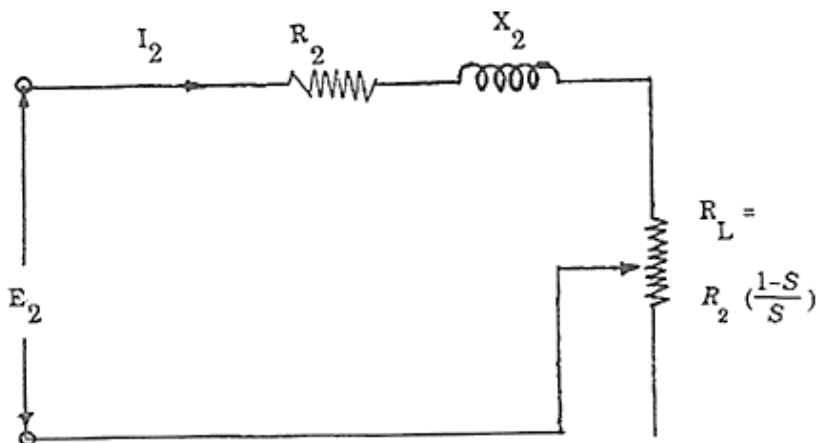
#### 9.2 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi

Rangkaian ekivalen atau untai ekivalen atau rangkaian setara atau rangkaian pengganti berguna untuk menyelesaikan analisis perhitungan motor induksi. Ada dua macam rangkaian ekivalen:

1. Rangkaian ekivalen yang sebenarnya.
2. Rangkaian ekivalen pendekatan.

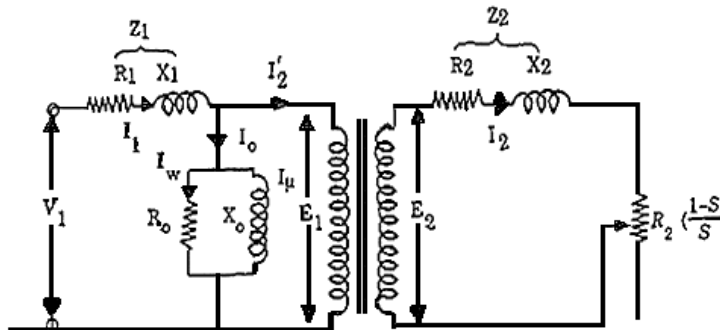
##### 9.2.1 Rangkaian ekivalen yang sebenarnya

Belitan/kumparan rotor kalau digambarkan secara rangkaian listrik, seperti diperlihatkan Gambar 9.1.



Gambar 9. 1. Rangkaian rotor motor induksi.

Rangkaian ini dapat diturunkan dari rangkaian listrik motor induksi berikut:



Gambar 9. 2. Rangkaian listrik motor induksi.

Rangkaian listrik motor induksi tersebut terdiri dari:

### 1. Rangkaian kumparan stator.

Rangkaian ini baik komponen maupun besarnya sebagai berikut:

$R_1$  = **Resistansi atau hambatan atau tahanan kumparan stator** dalam ohm ( $\Omega$ ) per fasa.

$X_1$  = **Reaktansi kumparan stator** dalam ohm ( $\Omega$ ) per fasa.

$R_o$  = **Resistansi rangkaian penguat** dalam ohm ( $\Omega$ ) per fasa atau disebut **konduktansi ( $G_o$ )** yang besarnya sama dengan  $\frac{1}{R_o}$ .

$X_o$  = **Reaktansi rangkaian penguat** dalam ohm ( $\Omega$ ) per fasa atau disebut **suseptansi ( $B_o$ )** =  $\frac{1}{X_o}$ .

$I_1$  = Arus yang mengalir pada kumparan stator dalam Ampere per fasa **jika motor berbeban**.

$I_o$  = Arus yang mengalir pada kumparan stator bila motor tidak berbeban (beban nol) dalam Amper per fasa.

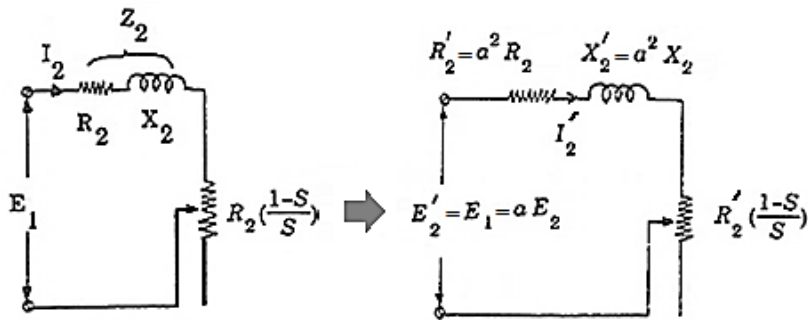
$V_1$  = Tegangan masuk atau tegangan yang diberikan ke kumparan stator dari jala-jala (sumber energi listrik) dalam besaran volt per fasa.

Jika kumparan stator tiga fasa hubungan bintang (Y) maka  $V_1$  sama dengan tegangan fasa ( $V_1 = V_{LL}/\sqrt{3}$ ), yang diberikan pada soal adalah  $V_{LL}$  ( $V_{LL} = V_{Line-to-Line} =$  **tegangan jala – jala**).

$E_1$  = EMF atau GGL atau tegangan induksi pada kumparan stator dalam volt per fasa.

## 2. Rangkaian kumparan rotor.

Rangkaian kumparan rotor ini seperti yang telah diberikan (lihat Gambar 9.1). Untuk mendapatkan rangkaian ekuivalen maka rangkaian kumparan rotor harus disesuaikan besaran dari komponen-komponennya yakni dipindahkan atau dilihat pada sisi stator dengan memperhatikan perbandingan transformasi, lihat Gambar 9.3 berikut ini.



Gambar 9. 3. Rangkaian rotor motor induksi yang dilihat/dipindahkan ke sisi stator.

Dari Gambar 9.3 tersebut maka hubungan komponennya sebelum dan sesudah dipindahkan ke stator akan mengikuti persamaan-persamaan:

$$E_2' = a E_2 = E_1 \quad (1)$$

$$I_2' = \frac{I_2}{a} \quad (2)$$

$$\frac{R_2'}{s} = a^2 \frac{R_2}{s} \quad (3)$$

$$X_2' = a^2 X_2 \quad (4)$$

Keterangan persamaan di sebelah :

$$a = \frac{N_1}{N_2} \frac{Kw_1}{Kw_2} = \text{Perbandingan transformasi}$$

$N_1$  = Banyaknya lilitan kumparan stator

$N_2$  = Banyaknya lilitan kumparan rotor

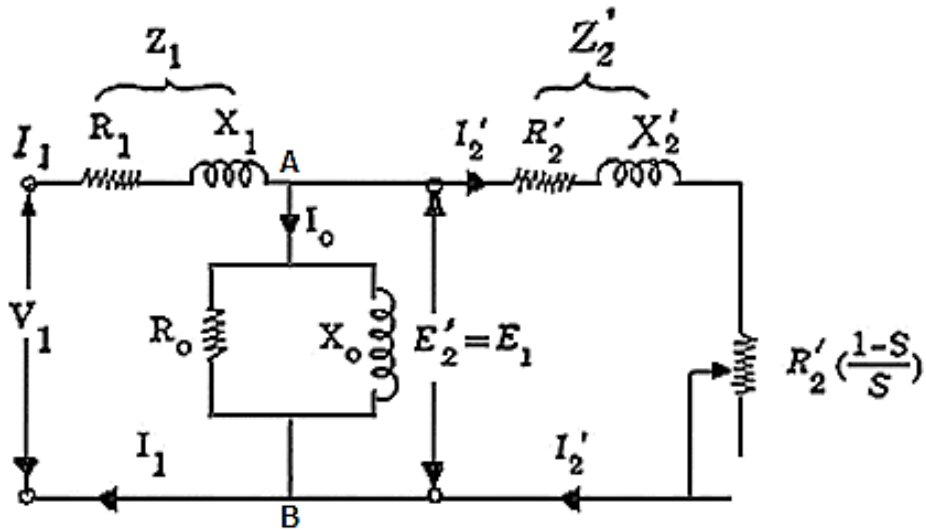
$Kw_1 = K_{p1} \times K_{d1} = \text{Faktor belitan stator}$

$Kw_2 = K_{p2} \times K_{d2} = \text{Faktor belitan rotor}$

$K_p$  = Faktor kisar belitan

$K_d$  = Faktor distribusi dari belitan

Setelah besaran dari komponen kumparan rotor diubah yaitu **dilihat (dipindahkan) ke stator** maka rangkaian ekivalen yang sebenarnya dapat dilihat pada Gambar 9.4.



Gambar 9. 4. Rangkaian ekivalen yang sebenarnya dari motor induksi.

Jika diperhatikan rangkaian ekivalen motor induksi pada Gambar 9.4 **sama dengan rangkaian ekivalen trafo** yang telah dibahas sebelumnya, untuk motor induksi rangkaiannya berputar sedang untuk trafo tidak.

### 9.2.2 Analisis Rangkaian Ekivalen Yang Sebenarnya

Dalam analisis perhitungan pada motor induksi maka dari rangkaian ekivalen yang sebenarnya (lihat Gambar 9.4), dapat menggunakan persamaan berikut:

1. Impedansi rangkaian stator,  $Z_1$  :

$$Z_1 = (R_1 + jX_1) = \left( \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \right) \angle \tan^{-1} \frac{X_1}{R_1} \quad (5)$$

2. Impedansi rangkaian penguat,  $Z_o$  :

$$Z_o = \frac{1}{Y_o} = \frac{1}{\frac{1}{R_o} - j \frac{1}{X_o}}$$

$$Z_o = \frac{1}{\left( \sqrt{\left[ \frac{1}{R_o} \right]^2 + \left[ \frac{1}{X_o} \right]^2} \right)} \angle \tan^{-1} \frac{X_o}{R_o} \quad (6)$$

3. **Impedansi rotor** yang telah dipindahkan ke stator,  $Z_2'$  :

$$Z_2' = \frac{R_2'}{S} + j X_2'$$

$$Z_2' = \left( \sqrt{\left( \frac{R_2'}{S} \right)^2 + (X_2')^2} \right) \angle \tan^{-1} \left[ \frac{X_2'}{(R_2'/S)} \right] \quad (7)$$

4. **Impedansi total**  $Z_{total}$  dari rangkaian yang diberikan ke sumber tegangan,  $V_1$ :

$$Z_{total} = Z_1 + \frac{Z_o Z_2'}{Z_o + Z_2'} = |Z_{total}| \angle \phi \quad (8)$$

5. **Arus stator** atau **arus jala-jala** atau **arus yang ditarik oleh stator** ( $I_1$ ):

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{total}} = |I_1| \angle \phi \quad (9)$$

6. **Daya input stator** ( $P_1$ ) atau daya masuk stator atau daya yang ditarik stator:

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \phi \text{ per fasa dalam watt} \quad (10)$$

7. **Faktor daya input** (faktor kerja input):

$$(p.f)_{input} = \cos \phi \quad (11)$$

8. **Arus yang mengalir pada rotor**:

$$I_2' = I_1 \times \frac{Z_o}{Z_o + Z_2'} \quad (12)$$

9. **Arus beban nol**:

$$I_o = I_1 \times \frac{Z_2'}{Z_o + Z_2'} \quad (13)$$

10. **Rugi tembaga stator:**

$$P_{cu_s} = I_1^2 R_1 \text{ per fasa dalam watt} \quad (14)$$

11. **Rugi inti:**

$$P_c = I_o^2 R_o \text{ per fasa dalam watt} \quad (15)$$

12. **Daya masuk rotor** (daya input rotor) atau daya yang ditarik rotor:

$$P_2 = [I_2']^2 \frac{R_2'}{S} = I_1^2 R_{AB} \text{ per fasa dalam watt} \quad (16)$$

13. **Rugi tembaga rotor:**

$$P_{cu_r} = [I_2']^2 R_2' = S \cdot P_2 \text{ per fasa dalam watt} \quad (17)$$

14. **Daya mekanik** atau daya output yang masih kotor (**Gross output**):

$$P_m = [I_2']^2 R_2' \left[ \frac{1-S}{S} \right] = (1-S) \cdot P_2 \text{ per fasa dalam watt} \quad (18)$$

15. **Daya output** atau **daya keluaran bersih** atau **daya rem** (**Brake Horse Power = BHP**):

$$P_o = P_m - \left[ \begin{array}{l} \text{rugi - rugi angin} \\ \text{dan geseran} \end{array} \right] \text{ per fasa dalam watt} \quad (19)$$

16. **Efisiensi** atau **rendamen** atau **daya guna**:

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \times 100\% \quad (20)$$

17. Untuk besaran dalam **3 fasa** maka:

$$P_1 ; P_2 ; P_{cu_s} ; P_c ; P_{cu_r} ; P_m \text{ dan } P_o \text{ dikalikan } 3 \\ \text{sedang } I_1 ; I_2 \text{ dan } I_o \text{ tetap.}$$

18. **Torsi elektromagnetis:**

$$T_g = \frac{P_m}{2\pi \left( \frac{N_r}{60} \right)} \text{ Newton - meter (N - m)} \quad (21)$$

**Contoh Soal 1.**

Suatu motor induksi 220 volt, 3 fasa, 4 kutub, 50 Hz hubungan bintang (**Y**) mempunyai takaran 5 HP.

**Parameter-parameter ekivalennya:**

$$R_1 = 0,45 \text{ ohm} ; R_2' = 0,4 \text{ ohm} ; B_o = -\frac{1}{30} \text{ mho}$$

$$X_1 = 0,8 \text{ ohm} ; X_2' = 0,8 \text{ ohm} ; G_o = 0$$

**Rugi inti stator 50 watt, rugi angin dan geseran 150 watt, untuk slip 0,04.**

Gunakan rangkaian ekivalen yang sebenarnya untuk menghitung:

- Arus input.
- p.f input
- Daya masuk rotor
- Daya mekanik
- Torsi elektromagnetis
- Daya output
- Efisiensi

**Penyelesaian:**

Dari untai ekivalen yang sebenarnya lihat Gambar 9.4,  $R_o$  atau  $G_o = 0$  (**diabaikan**) maka untuk  $Z_o$  hanya terdiri dari  $B_o$  atau  $X_o$ , selanjutnya  $Z_o$  diparalel dengan  $Z_2'$  menghasilkan  $Z_{AB}$  sebagai berikut :

$$Z_o = j X_o$$

$$Z_{AB} = \frac{Z_o Z_2'}{Z_o + Z_2'} = \frac{(j X_o) \left( \frac{R_2'}{S} + j X_2' \right)}{\left( \frac{R_2'}{S} \right) + j (X_2' + X_o)} = \frac{j30 (10 + j0,8)}{10 + j 30,8}$$

$$Z_{AB} = 8,58 + j 3,56 = 9,29 \angle 22,5^\circ$$

$$Z_{total} = Z_1 + Z_{AB} = (0,45 + j0,8) + 8,58 + j 3,56 \\ = 10 \angle 25,8^\circ$$

$$V_1 = V_{fasa} = \frac{220}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 127 \angle 0^\circ \quad \text{sebagai referensi vektor}$$

a. Arus input:

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{total}} = \frac{127 \angle 0^\circ}{10 \angle 25,8^\circ} = 12,7 \angle -25,8^\circ \quad \text{Ampere}$$

b. p.f input:  $\cos 25,8^\circ = 0,9$  lagging

c. Daya masuk rotor:

$$P_2 = 3 (I_2')^2 \left( \frac{R_2'}{S} \right) = 3 I_1^2 R_{AB}$$

$$P_2 = 3 \times 12,7^2 \times 8,58 = 4152 \text{ watt}$$

d. Daya mekanik:

$$P_m = (1 - S) P_2 = 0,96 \times 4152 = 3986 \text{ watt}$$

e. **Torsi elektromagnetis:**

Sesuai dengan persamaan (21), untuk menghitung *torsi elektromagnetis* ( $T_g$ ) harus dihitung dulu *kecepatan rotor* ( $N_r$ ) dari motor sebagai berikut:

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot 50}{4} = 1500 \text{ rpm}$$

$$N_r = (1 - S) N_s = (1 - 0,04) \times 1500 = 1440 \text{ rpm}$$

$$T_g = \frac{P_m}{2\pi \left( \frac{N_r}{60} \right)} = \frac{3986}{2\pi \left( \frac{1440}{60} \right)} = 26,5 \text{ N - m}$$

f. Daya output:

$$P_o = P_m - \text{rugi angin dan geseran}$$

$$P_o = 3986 - 150 = 3836 \text{ watt}$$

g. Efisiensi (rendamen):

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100\% = \frac{P_o}{P_o + \text{rugi} - \text{rugi inti}} \times 100\%$$

**Rugi-rugi:**

$$P_{cu_s} = 3 I_1^2 R_1 = 3 \times 12,7^2 \times 0,45 = 218 \text{ watt}$$

$$P_c = \text{rugi-rugi inti stator} = 50 \text{ watt}$$

$$P_{cu_r} = 3 (I_2')^2 R_2 = S P_2 = 0,04 \times 4152 = 166 \text{ watt}$$

$$\text{Rugi angin dan geseran} = 150 \text{ watt}$$

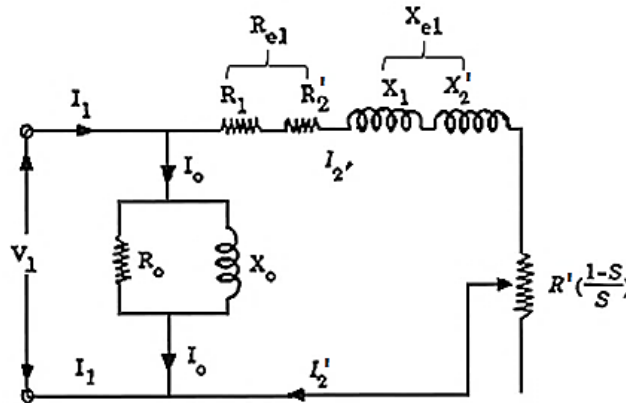
---


$$\text{Rugi-rugi total} = 584 \text{ watt}$$

$$\eta = \frac{3836}{3836 + 584} \times 100\% = 86,8\%$$

### 9.2.3 Rangkaian ekivalen pendekatan

Rangkaian ekivalen pendekatan dari motor induksi sama dengan rangkaian ekivalen yang sebenarnya, tetapi rangkaian penguat **digeser** ke terminal motor seperti pada Gambar 9.5.



Gambar 9. 5. Rangkaian ekivalen pendekatan dari motor induksi.

Rangkaian pendekatan ini dibuat untuk memudahkan perhitungan, dari gambar tersebut  $Z_1$  dan  $Z_2$  langsung dapat dijumlahkan, kemudian diparalelkan dengan  $Z_0$ .

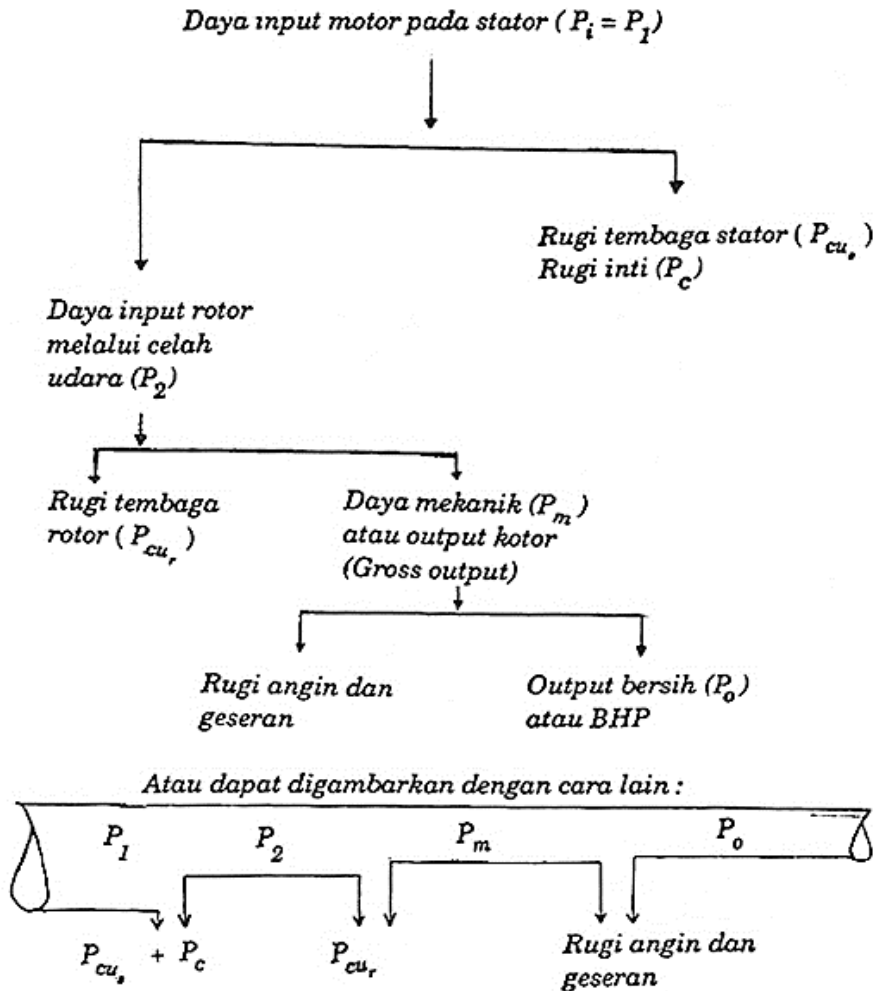
Analisis perhitungannya *sama dengan* analisis perhitungan untuk rangkaian ekivalen yang sebenarnya, hasilnya berbeda sekitar 2 – 5% sehingga masih dapat diterima. Hasil dengan kesalahan 2-5% tersebut disebabkan pada rangkaian ekivalen pendekatan, arus  $I_1$  tidak melalui  $Z_1$  demikian pula  $I_0$  nya.

### 9.3 Tingkatan Daya pada Motor Induksi

Dari analisis rangkaian ekivalen motor induksi dapat disimpulkan bahwa *tingkatan daya pada motor induksi* seperti bagan pada Gambar 9.6.

Dari Gambar 9.6 tersebut dapat dilihat bahwa **daya input** atau **daya masukan ke stator** atau **daya yang ditarik motor dari jala-jala listrik** sebesar  $P_i = P_1$  sebagian digunakan untuk mengatasi rugi-rugi daya di stator yaitu **rugi tembaga stator** ( $P_{cu_s}$ ) dan **rugi inti** sebesar  $P_c$  baru sisanya masuk rotor sebesar  $P_2$  melalui **celah udara**.

Selanjutnya **daya masuk rotor** atau **daya yang ditarik rotor** ( $P_2$ ) sebagian dipakai lagi untuk mengatasi **rugi tembaga rotor** ( $P_{cu_r}$ ), kemudian sisanya menjadi **daya mekanik** ( $P_m$ ) atau daya output yang masih kotor (*gross output*). **Dari daya mekanik** sebagian lagi digunakan untuk mengatasi rugi angin dan geseran, baru sisanya menjadi **daya output yang bersih** ( $P_o$ ) atau **BHP** (*Brake Horse Power*).



Gambar 9. 6. Tingkatan daya pada motor induksi.

### Contoh Soal 2.

Motor induksi 3 fasa, 400 volt, 6 kutub, 60 Hz bekerja pada kecepatan 1140 rpm dengan input 40 kW pada faktor daya 0,8 terbelakang. Rugi stator total 1 kW, rugi angin dan geseran 2 kW. Hitunglah:

- Slip dan arus input.
- Rugi tembaga rotor.
- Daya output (*BHP*).
- Efisiensi.

**Penyelesaian:**

$$a. \quad N_s = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

$$S = \frac{1200 - 1140}{1200} = 0,05 \text{ atau } 5\%.$$

$$P_i = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cos \phi$$

$$40.000 = \sqrt{3} \times 400 \times I \times 0,8 \rightarrow I = 72,2 \text{ Ampere.}$$

$$b. \quad \text{Input motor} = 40 \text{ kW}$$

$$\text{Rugi stator} = 1 \text{ kW}$$

$$\text{Daya masuk rotor, } P_2 = 40 - 1 = 39 \text{ kW}$$

$$\text{Rugi tembaga rotor} = S P_2 = S \times 39 = 1,95 \text{ kW}$$

$$c. \quad \text{Daya mekanik, } P_m = P_m (1 - S) = 39 (1 - 0,05) = 37,05 \text{ kW}$$

$$\text{Daya output (BHP)} = P_m - \text{rugi angin dan geseran} = 37,05 - 2 = 35,05 \text{ kW}$$

$$d. \quad \text{Efisiensi motor, } \eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100\% = \frac{35,05}{40} \times 100\% = 87,6\%$$

#### 9.4 Torsi Pada Motor Induksi

Telah dibahas prinsip kerja dari motor induksi bahwa setelah **timbul torsi pada motor**, maka **motornya akan berputar**. Torsi pada motor induksi ini dapat diperinci sebagai berikut:

- Torsi yang dibangkitkan oleh motor, waktu rotornya belum berputar ( $T_{WBB}$ )**, akan mengikuti persamaan:

$$T_{WBB} = k_1 E_2 I_2 \cos \phi_2 \quad \text{Newton - meter (N - m)} \quad (22)$$

dengan,

$E_2$  = **EMF (GGL) atau tegangan induksi di rotor, waktu belum berputar**, per fase dalam volt.

$I_2$  = **Arus rotor per fasa** dalam Amper.

$\cos \phi_2$  = **Faktor kerja rotor**.

$k_1 = \frac{3}{2\pi N_s}$  didapatkan dari **syarat-syarat batas** dimana **3** menyatakan **motor 3 fasa**.

2. **Torsi start pada motor induksi.**

**Torsi start ( $T_s$ )** atau torsi motor waktu motor akan mulai berputar, mengikuti persamaan berikut:

$$T_s = \frac{K_1 E_2^2 R_2}{R_2^2 + X_2^2} N - m \quad (23)$$

Keterangan persamaan (23) diatas,

$E_2$  = **EMF (GGL) atau tegangan induksi di rotor, waktu belum berputar** per fasa dalam volt.

$R_2$  = **Resistansi rotor** per fasa dalam ohm.

$X_2$  = **Reaktansi rotor** per fasa dalam ohm, **waktu rotor belum berputar**.

**Torsi start maksimum ( $T_s$  maks) bila:**

$$R_2 = X_2 \quad (24)$$

3. **Torsi motor waktu rotor sudah berputar.**

Torsi motor waktu rotor berputar ( $T_{WB}$ ) akan mengikuti persamaan berikut:

$$T_{WB} = \frac{k_1 (S E_2)^2 R_2}{R_2^2 + (S X_2)^2} N - m \quad (25)$$

dengan:

$S = Slip$

$E_2$ ,  $R_2$ ,  $X_2$ , dan  $k_1$  adalah seperti pada butir 1 dan 2 diatas.

Torsi motor maksimum waktu berputar ( $T_{WB}$  maks) bila:

$$R_2 = S X_2 \quad (26)$$

#### 4. Torsi beban

Waktu rotor sudah berputar dan dibebani maka torsi beban ( $T_B$ ) dalam besaran watt sinkron akan mengikuti persamaan berikut:

$$T_B = \frac{3 (I_2')^2 R_2}{S} = \frac{P_m}{1 - S} \quad (27)$$

dengan,

$I_2'$  = Arus rotor yang ditinjau dari stator.

$P_m$  = Daya mekanik.

$R_2$  dan  $S$  seperti pada butir 1, 2 dan 3 diatas.

#### 5. Hubungan antara torsi maksimum waktu rotor berputar ( $T_{WB \text{ maks}}$ ) dengan torsi beban penuh ( $T_{BP}$ ).

Perbandingan antara torsi maksimum waktu rotor berputar ( $T_{WB \text{ maks}}$ ) dengan torsi beban penuh ( $T_{BP}$ ) akan mengikuti persamaan berikut:

$$\frac{T_{BP}}{T_{WB \text{ maks}}} = \frac{2a S_{BP}}{a^2 + S_{BP}^2} \quad (28)$$

dengan,

$S_{BP}$  = Slip pada waktu beban penuh.

$a$  =  $\frac{R_2}{X_2}$  (Resistansi/reaktansi rotor per fasa waktu belum berputar atau *diam*).

#### 6. Hubungan antara torsi start ( $T_S$ ) dengan torsi maksimum waktu berputar ( $T_{WB \text{ maks}}$ ).

Perbandingan antara torsi start ( $T_S$ ) dengan torsi maksimum waktu berputar ( $T_{WB \text{ maks}}$ ) akan mengikuti persamaan berikut:

$$\frac{T_S}{T_{WB \text{ maks}}} = \frac{2a}{1 + a^2} \quad (29)$$

dimana:  $a$  sama dengan  $a$  pada butir 5 diatas.

#### Contoh Soal 3.

Motor induksi rotor kurung 3 fasa, 8 kutub, 50 Hz mempunyai:

$$R_{rotor} = 0,001 \text{ ohm per fasa}$$

$$X_{(o)rotor} = 0,005 \text{ ohm per fasa}$$

$$T_{WB \text{ maks}} = 520 \text{ N-m}$$

sedang bekerja melayani beban penuh pada slip 2 %.

Hitunglah:

- Torsi beban penuh ( $T_{BP}$ ).
- Apabila kemudian beban ditambah sehingga  $T_{BP} = T_{WB \text{ maks}}$ , menjadi berapa kecepatannya.

**Penyelesaian:**

$$\text{a. } a = \frac{R_2}{X_2} = \frac{0,001}{0,005} = 0,2; S_{BP} = 0,02 = 2\%$$

$$\frac{T_{BP}}{T_{WB \text{ maks}}} = \frac{2a S_{BP}}{a^2 + S_{BP}^2} = \frac{2 \times 0,2 \times 0,02}{0,04 + 0,0004} = \frac{0,008}{0,0404} = 0,198$$

$$T_{BP} = 0,198 \times 520 = 102,97 \text{ N} - m$$

- $T_{BP} = T_{WB \text{ maks}}$  maka  $T_{BP}/T_{WB \text{ maks}} = 1$

$$\frac{T_{BP}}{T_{WB \text{ maks}}} = \frac{2a S_{BP}}{a^2 + S_{BP}^2} = 1$$

$$\frac{2 \times 0,2 \times S_{BP}}{0,04 + S_{BP}^2} = 1 \rightarrow S_{BP}^2 - 0,4 S_{BP} + 0,04 = 0$$

$$(S_{BP} - 0,2)^2 = 0 \rightarrow S_{BP} = 0,2 = 20\%$$

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \times 60}{8} = 750 \text{ rpm}$$

$$S_{BP} = \frac{N_s - N_r}{N_s} \rightarrow 0,2 = \frac{750 - N_r}{750}$$

$$N_r = 750 - 150 = 600 \text{ rpm}$$

#### **Contoh Soal 4.**

Motor induksi 3 fasa rotor lilit, 6 kutub, 50 Hz, resistansi kumparan rotor 0,02 ohm/fase, sedang melayani beban penuh dengan kecepatan 960 rpm. Dengan pengaturan resistansi seperti lazimnya terhadap motor slip ring, kecepatannya akan menjadi 800 rpm. Jelaskan bagaimana caranya dan hitunglah resistansinya.

**Keterangan:** *torsi beban tetap.*

**Penyelesaian:**

Caranya dengan menyisipkan resistansi tambahan pada rangkaian rotor agar putarannya dapat diatur, sedangkan perhitungan mengenai besarnya resistansi yang harus disisipkan adalah sebagai berikut:

**Kecepatan medan putar stator:**

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ rpm}$$

Kecepatan 960 rpm waktu melayani beban penuh,

$$\text{Slip} - \text{nya } (S_1) = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0,04 = 4\%$$

$$\begin{aligned} \text{Torsi beban } (T_B) &= \frac{3 (I_2')^2 R_2}{S} \\ &= \frac{3 (I_2')^2 \times 0,02}{0,04} \text{ watt sinkron} \end{aligned}$$

Kecepatan turun menjadi 800 rpm setelah disisipkan **resistansi** ( $r$ ), pada **resistansi kumparan rotor** ( $R_2$ ).

$$\text{Slip} - \text{nya } (S_2) = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1000 - 800}{1000} = 0,2 = 20\%$$

$$\begin{aligned} \text{Torsi beban } (T_B) &= \frac{3 (I_2')^2 (R_2 + r)}{S_2} \\ &= \frac{3 (I_2')^2 (0,02 + r)}{0,2} \text{ watt sinkron} \end{aligned}$$

Karena **Torsi beban tetap**, maka:

$$\frac{3 (I_2')^2 \times 0,02}{0,04} = \frac{3 (I_2')^2 (0,02 + r)}{0,2}$$

$$0,5 = 0,1 + 5r$$

$$r = 0,08 \text{ ohm}$$

Resistansi yang harus ditambahkan pada rangkaian rotor sebesar 0,08 ohm agar kecepatan menjadi 800 rpm.

### Contoh Soal 5.

Motor induksi rotor belitan (slip ring motor) 3 fasa, 400/200 volt, hubungan Y-Y, mempunyai resistansi rotor per fasa 0,06 ohm dan reaktansi rotor per fasa pada waktu diam 0,3 ohm. Hitung resistansi yang diperlukan dan harus ditambahkan pada rangkaian rotor agar torsi start sama dengan torsi maksimum waktu rotor berputar.

**Penyelesaian:**

$$\frac{T_s}{T_{WB \text{ maks}}} = \frac{2a}{1+a^2}; \quad T_s = T_{WB \text{ maks}}$$

$$1 = \frac{2a}{1+a^2} \rightarrow a^2 - 2a + 1 = 0 \rightarrow (a-1)^2 = 0 \rightarrow a = 1$$

$$a = \frac{R_2 + r}{X_2} \text{ dengan,}$$

$r$  = Resistansi yang harus ditambahkan pada rangkaian rotor (resistansi luar).

$$1 = \frac{0,06 + r}{0,3} \rightarrow r = 0,3 - 0,06 = 0,24 \text{ ohm}$$

Resistansi yang harus ditambahkan pada rangkaian rotor sebesar 0,24 ohm.

## 9.5 Pengujian Motor Induksi

**Pengujian yang penting pada motor induksi** adalah:

- a. **Pengujian beban nol.**
- b. **Pengujian hubung singkat (rotor diblok).**

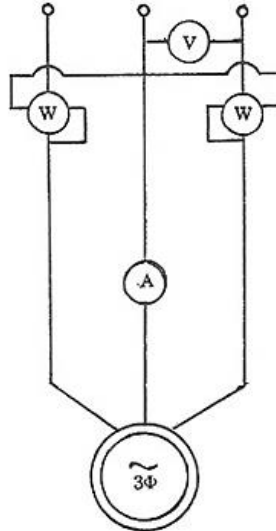
### 9.5.1 Pengujian beban nol

- **Maksud dan tujuan pengujian**

Maksud dan tujuan pengujian beban nol dari motor induksi ini untuk mendapatkan **data mengenai arus, daya serta rugi-rugi pada waktu beban nol.**

- **Rangkaian pengujian**

Rangkaian pengujian beban nol dari motor induksi ini, lihat Gambar 9.7 berikut ini.



Gambar 9. 7. Percobaan beban nol.

- **Pelaksanaan pengujian**

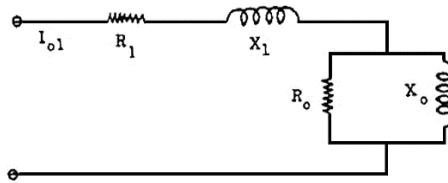
1. Hubungkan motor dengan sumber, pada tegangan dan frekuensi nominal.
2. Arus dan daya masuk waktu beban nol dapat dibaca pada meter.
3. Tegangan masuk dapat divariasikan sehingga arus dan daya masuk pada waktu beban nol juga akan bervariasi, dengan demikian dapat digambarkan *kurva karakteristik arus dan daya masuk waktu beban nol* sebagai fungsi dari tegangan masuk.

- **Analisis karakteristik beban nol**

Pada waktu beban nol maka daya masuk ( $P_o$ ) terdiri dari *rugi inti*, *rugi gesek bantalan dan angin serta rugi tembaga beban nol* atau dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_o = P_{core} + P_{f+w} + I_{o1}^2 R_1 + I_{o2}^2 R_2 \quad (30)$$

Karena *slip kecil* maka *rugi tembaga rotor* ( $I_{o2}^2 R_2$ ) dapat diabaikan, sehingga rangkaian ekivalennya beban nol adalah sebagai berikut:



Gambar 9. 8. Rangkaian ekivalen pada waktu beban nol.

Dengan mengabaikan rugi tembaga rotor pada *waktu pengujian beban nol* maka persamaan (30) menjadi:

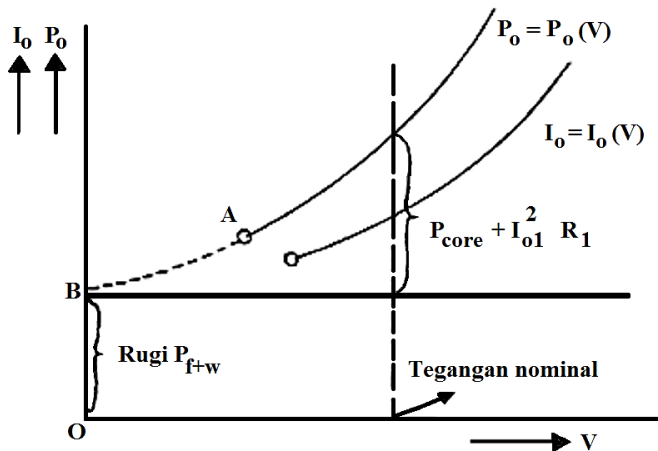
$$P_o = P_{core} + P_{f+w} + I_{o1}^2 R_1 \quad (31)$$

**Rugi tembaga stator** ( $I_{o1}^2 R_1$ ) kadang-kadang cukup besar hingga perlu diperhitungkan:

Dari persamaan (30) didapatkan **rugi inti dan rugi gesek bantalan dan angin** yang besarnya **KONSTAN** sebagai berikut:

$$P_{core} + P_{f+w} = P_o - I_{o1}^2 R_1 \quad (32)$$

Untuk memisahkan  $P_{core} + P_{f+w}$  didapatkan dari kurva karakteristik yang telah diuraikan diawal. Gambar 9.9 memperlihatkan lengkung karakteristik tersebut.



Gambar 9. 9. Diagram karakteristik beban nol.

Dari diagram karakteristik di atas, rugi  $P_{f+w}$  dapat diambil *sama dengan daya masuk pada tegangan minimum* dimana **motor akan berputar**, karena pada saat ini rugi dapat diabaikan.

Untuk lengkung  $P_o = P_o(V)$  pencatatan hanya dapat dilakukan sampai titik **A**, dengan memperpanjang lengkung ini sampai memotong sumbu tegak pada titik **B**, maka rugi  $P_{f+w}$  dapat diambil sama dengan **OB**.  
Pemisahan **rugi inti**:

$$P_c = P_e + P_h \quad (33)$$

dengan,

$$P_e = k_1 f^2 B_m^2 = k_1 V^2 \quad (34)$$

$$P_h = k_2 f B_m^2 = k_2 \left(\frac{V}{f}\right)^2 \quad (35)$$

**Cara memisahkan rugi inti** adalah sebagai berikut:

1. Cari **B (kerapatan fluksi maksimum) konstan** yang dikerjakan dengan membuat  $V/f$  konstan.
2. Tentukan nilai-nilai dari  $V$  dan nilai-nilai dari  $f$  bersangkutan demikian hingga  $V/f$  konstan.
3. Ukur nilai-nilai daya masuk  $P$  pada berbagai nilai  $V$ .
4. Nilai **rugi inti** :

$$P_c = P_o - P_{f+w} \quad (36)$$

$P_{f+w}$  telah ditentukan terdahulu dan dapat dianggap tetap nilainya.

5. Cara perhitungan, dengan mengandaikan:

Untuk tegangan jepitan  $V_1$  ; daya masuk  $P_{o1}$  ; frekuensi  $f_1$  ; sehingga,

$$P_{c1} = P_{o1} - P_{f+w} \quad (37)$$

Untuk tegangan jepitan  $V_2$  ; daya masuk  $P_{o2}$  ; frekuensi  $f_2$  ; sehingga,

$$P_{c2} = P_{o2} - P_{f+w} \quad (38)$$

Masukkan persamaan (37) dan persamaan (38) ke dalam persamaan (33), demikian pula persamaan (34) dan persamaan (35) akan diperoleh:

$$P_{c1} = k_1 (V_1)^2 + k_2 f_1 \left(\frac{V_1}{f_1}\right)^a \quad (39)$$

$$P_{c2} = k_1 (V_2)^2 + k_2 f_2 \left(\frac{V_2}{f_2}\right)^a \quad (40)$$

$$\frac{V_1}{f_1} = \frac{V_2}{f_2} \quad (41)$$

Dari persamaan tersebut diatas  $k_1$  dan  $k_2$  dapat dihitung sehingga nilai-nilai  $P_e$  dan  $P_h$  akan didapat.

### 9.5.2 Pengujian hubung singkat atau rotor diblok

#### a. Maksud dan tujuan pengujian

**Pengujian hubung singkat atau rotor diblok** ini, dimaksudkan untuk mendapatkan data motor yaitu: *arus, daya, serta faktor daya waktu hubung singkat*, juga karakteristik dari daya dan arus hubung singkat sebagai **fungsi dari tegangan masuk**.

#### b. Rangkaian pengujian

Rangkaian pengujian ini sama dengan rangkaian pengujian waktu beban nol, hanya disini **motornya dikopel dengan motor yang lain untuk membloknnya**.

#### c. Pelaksanaan pengujian

Secara singkat, pelaksanaan pengujian ini adalah sebagai berikut:

a. **Terminal stator dihubungkan dengan tegangan jala-jala**, dengan catatan **tegangan terminal stator** adalah *lebih kecil dari tegangan dasar motor*. Untuk mendapatkan beberapa titik pengamatan, dimulai dengan tegangan jala-jala yang terendah, baru dinaikkan setingkat demi setingkat, *sampai arus hubung singkat kira-kira mencapai dua kali arus nominalnya*.

b. *Setiap tegangan jala-jala dinaikkan, blok atau tahan rotornya, sehingga tidak dapat berputar*, kemudian catat tegangan, arus dan dayanya.

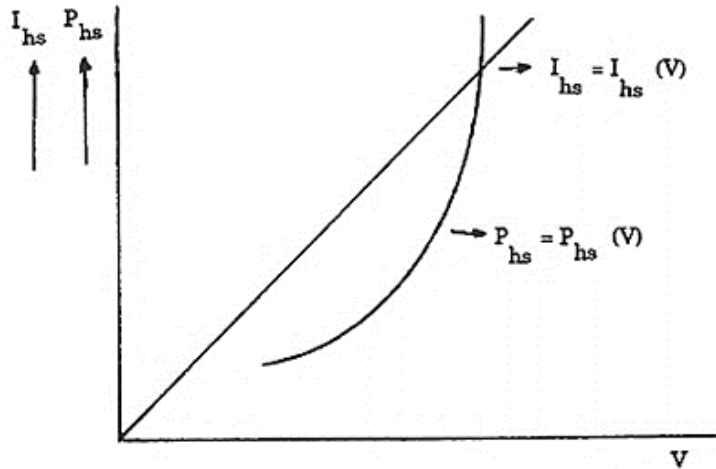
Percobaan ini *tidak dapat* dilakukan untuk **tegangan terminal stator sama dengan tegangan dasarnya**, karena akan menimbulkan panas yang berlebihan, menyebabkan isolasi motor rusak.

Dari pengamatan dapat dilukiskan **karakteristik daya hubung singkat dan arus hubung singkat** sebagai *fungsi dari tegangan jala-jala* yang dinaikkan setingkat demi setingkat sebagai berikut:

$$I_{hs} = I_{hs}(V) \quad (42)$$

$$P_{hs} = P_{hs}(V) \quad (43)$$

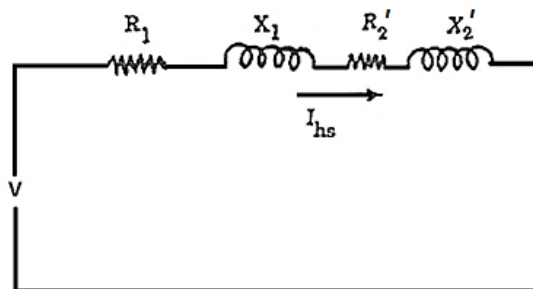
Karakteristik dari pengujian dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 9. 10. Diagram karakteristik hubung singkat.

**d. Analisis karakteristik hubung singkat**

Pada waktu hubung singkat komponen arus magnetisasi relatif **kecil sekali** terhadap **arus hubung singkat** ( $I_{hs}$ ) sehingga rangkaian ekivalen dalam keadaan hubung singkat sebagai berikut:



Gambar 9. 11. Rangkaian ekivalen hubung singkat.

Dari pengujian hubung singkat ini didapatkan data sebagai berikut:

$$R_e = R_1 + R_2' = \frac{P_{hs}}{I_{hs}^2} \quad (44)$$

$$Z_e = R_e + j X_e = \frac{V}{I_{hs}} \quad (45)$$

$$X_e = X_1 + X_2' \quad (46)$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} \quad (47)$$

Nilai resistansi pada temperatur kerja (75° C) dapat ditentukan jika temperatur ruangan pada saat pengujian dicatat.

## 9.6 Soal Latihan

### 9.6.1 Soal Teori Motor Induksi

1. Jelaskan cara meng-ekivalenkan beban mekanis dari motor induksi ke dalam rangkaian listrik dari rotor?
2. Jelaskan rangkaian ekivalen yang sebenarnya dan rangkaian ekivalen pendekatan dari motor induksi, apa bedanya dengan trafo?
3. Jelaskan tingkatan daya pada motor induksi?
4. Jelaskan torsi apa saja yang timbul pada motor induksi?
5. Pengujian apa saja yang dapat dilakukan pada motor induksi, jelaskan dengan singkat.

### 9.6.2 Soal Perhitungan Motor Induksi

1. Motor induksi 3 fasa, 440 volt, 4 kutub, 50 Hz, hubungan **Y** mempunyai parameter berikut:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,1 \text{ ohm} & R_2' &= 0,15 \text{ ohm} \\ X_1 &= 0,4 \text{ ohm} & X_2' &= 0,44 \text{ ohm} \end{aligned}$$

**Rugi inti stator** 1250 watt, **rugi angin dan geseran** 1000 watt. Pada waktu beban nol, menarik arus 250 Ampere pada faktor daya 0,09 mengikuti.

Bila motor bekerja dengan **slip 3%**, hitunglah (**gunakan untai ekivalen pendekatan**) :

- a. Arus stator dan faktor dayanya.
- b. Daya masuk rotor.
- c. Torsi elektromagnetis.
- d. Daya mekanis.

- e. Daya output bersih (*BHP*).
- f. Efisiensi motor.

2. Motor induksi 3 fasa, 400 volt, 4 kutub, 50 Hz, hubungan **Y** mempunyai parameter:

$$R_1 = 0,4 \text{ ohm} \quad R_2' = 0,6 \text{ ohm} \quad R_o = 10 \text{ ohm}$$

$$X_1 = 1,0 \text{ ohm} \quad X_2' = 1,0 \text{ ohm} \quad X_o = 50 \text{ ohm}$$

**Rugi inti stator** 100 watt, **rugi angin dan geseran** 150 watt. Jika **slip 5%**, hitunglah (**gunakan untai ekivalen yang sebenarnya**):

- a. Arus stator, rotor dan arus beban nol.
- b. Faktor daya stator, rotor dan beban nol.
- c. Daya masuk stator dan rotor.
- d. Daya mekanik dan daya output.
- e. Rugi tembaga stator dan rotor.
- f. Torsi elektromagnetis.
- g. Efisiensi motor.

**[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]**

# **BAB 10**

## **MOTOR ARUS SEARAH (DC)**

### **KONSTRUKSI DAN PRINSIP KERJA**

#### **10.1 Pendahuluan**

Mesin listrik arus searah terbagi atas :

- 1. Motor arus searah**
- 2. Generator arus searah.**

**Motor arus searah** banyak digunakan untuk menghasilkan tenaga mekanik berupa kecepatan atau perputaran, baik untuk mesin-mesin produksi di pabrik dan di industri maupun untuk traksi, tram listrik dan sebagainya. Untuk traksi, tram listrik sampai sekarang masih banyak menggunakan motor arus searah, demikian pula untuk start awal dari mobil, dan rangkaian peralatan elektronik.

Berdasarkan karakteristiknya, maka motor arus searah ini mempunyai **pengaturan putaran yang luas** dibandingkan dengan motor arus bolak balik, sehingga sampai sekarang masih banyak digunakan pada pabrik dan industri seperti pabrik kertas, tekstil, dan pabrik-pabrik yang mesin produksinya memerlukan pengaturan putaran yang luas. Konstruksi motor arus searah sama dengan konstruksi generator arus searah, hanya perbedaannya pada prinsip kerjanya, sehingga satu perangkat mesin arus searah dapat berfungsi sebagai generator maupun sebagai motor.

#### **10.2 Motor Arus Searah**

Secara sederhana motor arus searah dapat *didefinisikan* sebagai **suatu mesin listrik yang mengubah energi listrik pada arus searah (*dc*) menjadi energi gerak atau energi mekanik, dimana energi gerak tersebut berupa putaran pada bagian yang disebut *rotor***. Pada prinsipnya operasi motor arus searah sangat identik dengan generator arus searah. Kenyataannya mesin yang bekerja sebagai generator arus searah akan dapat bekerja sebagai motor arus searah. Oleh sebab itu, sebuah mesin arus searah dapat digunakan baik sebagai motor arus searah maupun generator arus searah.

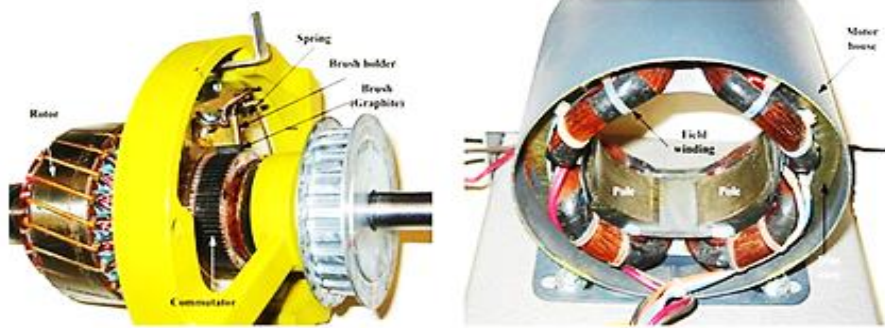
Secara umum motor arus searah terdiri dari **bagian stator** (*bagian yang diam*) dan **bagian rotor** (*bagian yang berputar*). Pada bagian yang **diam** (**stator**) merupakan *tempat diletakkannya kumparan medan* yang *berfungsi untuk menghasilkan fluksi magnet*, sedangkan bagian yang **berputar** (**rotor**) *ditempati oleh rangkaian jangkar seperti kumparan jangkar, komutator dan sikat*.

*Motor arus searah bekerja berdasarkan prinsip interaksi antara dua fluksi magnetik*. Dimana kumparan medan akan menghasilkan fluksi magnet yang arahnya dari kutub utara menuju kutub selatan dan kumparan jangkar akan menghasilkan fluksi magnet yang melingkar. *Interaksi antara kedua fluksi magnet ini menimbulkan suatu gaya. Gaya yang timbul tersebut akan menghasilkan putaran atau torsi*.

Motor arus searah digunakan secara luas pada berbagai motor penggerak dan pengangkut dengan *kecepatan yang bervariasi* yang membutuhkan *respon dinamis* dan keadaan *steady-state*. Motor arus searah mempunyai pengaturan yang sangat mudah dilakukan dalam berbagai kecepatan dan beban yang bervariasi. Itu sebabnya motor arus searah digunakan pada berbagai aplikasi tersebut. *Pengaturan kecepatan* ini dapat dilakukan dengan **memperbesar atau memperkecil arus yang mengalir pada jangkar menggunakan sebuah tahanan**.



Gambar 10. 1. Motor arus searah (dc).



Cutaway view of a dc motor

Stator with poles visible.

Gambar 10. 2. Stator dan rotor motor dc.

### 10.3 Konstruksi Motor Arus Searah

Konstruksi dari mesin arus searah terbagi atas:

1. **Stator** adalah bagian mesin arus searah yang **diam**.
2. **Rotor** atau **angker** atau **jangkar** atau **armature** adalah bagian dari mesin yang **berputar**.
3. **Celah udara** adalah ruangan yang ada antara **stator** dan **jangkar**.

Dari gambar tersebut maka **stator** terdiri dari:

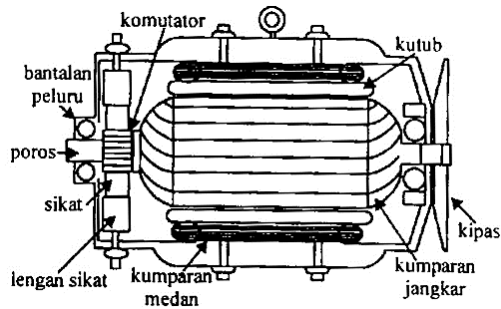
- i. **Gandar (rumah)**, terbuat dari besi tuang.
- ii. **Kutub**, terdiri dari:
  - a. **Inti** dari besi lunak atau baja silikon.
  - b. **Sepatu kutub** materialnya sama dengan inti,
  - c. **Lilitan** dari tembaga.

**Rotor** atau **armature (jangkar = angker)** terdiri atas :

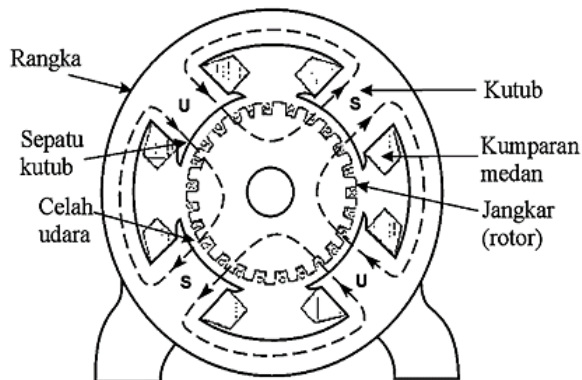
- i. **Inti**, materialnya sama dengan inti kutub.
- ii. **Belitan (penghantar)**, dari tembaga.
- iii. **Komutator**, dari tembaga
- iv. **Sikat**, dari karbon.

Secara umum motor arus searah memiliki konstruksi yang sama, terbagi atas dua bagian, yaitu : **bagian yang diam** dan **bagian yang bergerak**.

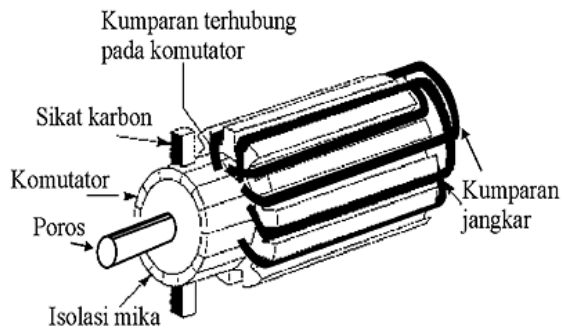
**Bagian yang diam** disebut **stator** dan **bagian yang berputar/bergerak** disebut **rotor**. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 10.3 di bawah ini.



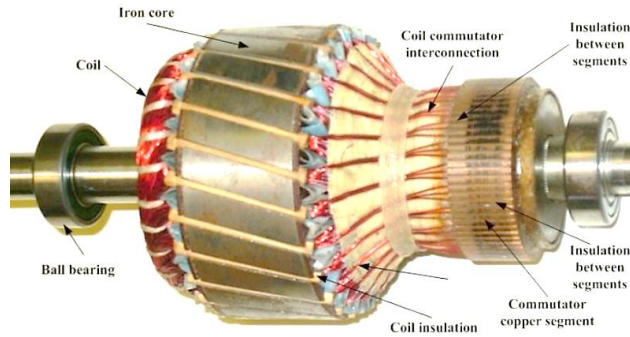
Gambar 10. 3. Konstruksi motor arus searah (dc).



Gambar 10. 4. Konstruksi motor arus searah (dc) bagian stator.



Gambar 10. 5. Bagian-bagian rotor mesin arus searah.



Gambar 10. 6. Konstruksi rotor motor arus searah (dc).



Gambar 10. 7. Sikat dan komponen sikat.

### 10.3.1 Badan Motor (rangka)

**Rangka motor arus searah** adalah tempat meletakkan sebagian besar komponen mesin dan melindungi bagian mesin. Untuk itu rangka harus dirancang memiliki kekuatan mekanis yang tinggi untuk mendukung komponen-komponen mesin tersebut. **Rangka** (*frame* atau *yoke*) mesin arus searah seperti juga mesin-mesin listrik lainnya secara umum memiliki dua fungsi, yaitu:

1. Untuk membawa fluks magnetik yang dihasilkan oleh kutub-kutub magnet.
2. Merupakan sarana pendukung mekanik untuk mesin secara keseluruhan.

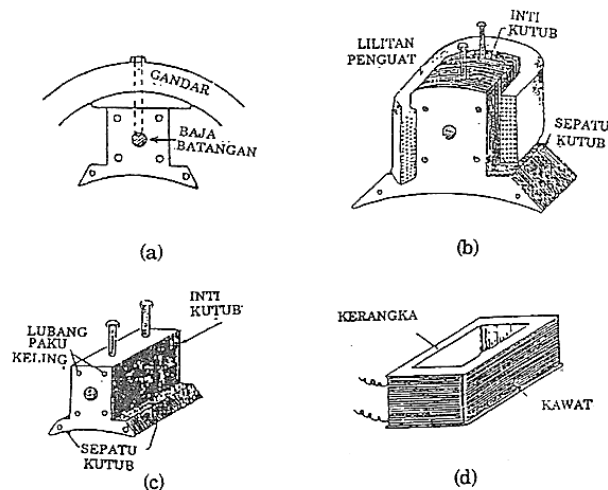
Rangka dibuat dengan menggunakan bahan *ferromagnetik* yang memiliki **permeabilitas tinggi**. Rangka biasanya terbuat dari baja tuang (*cast steel*) atau baja lembaran (*rolled steel*) yang berfungsi sebagai penopang mekanis dan juga sebagai bagian dari rangkaian magnet. Biasanya pada badan (rangka) motor terdapat papan nama (*name plate*)

yang bertuliskan spesifikasi umum atau data-data teknik dari mesin tersebut.

### 10.3.2 Kutub Medan

**Kutub medan** terdiri atas **inti kutub** dan **sepatu kutub**. Sepatu kutub yang berdekatan dengan celah udara dibuat lebih besar dari badan inti. Dimana fungsinya adalah untuk menahan kumparan medan di tempatnya dan menghasilkan distribusi fluksi yang lebih baik yang tersebar di seluruh jangkar dengan menggunakan permukaan yang melengkung.

**Inti kutub** terbuat dari laminasi pelat-pelat baja yang terisolasi satu sama lain. Sepatu kutub dilaminasi dan dibaut ke inti kutub. Maka kutub medan (inti kutub dan sepatu kutub) direkatkan bersama-sama kemudian dibaut pada rangka. Pada inti kutub ini dibelitkan kumparan medan yang terbuat dari kawat tembaga yang berfungsi untuk menghasilkan fluksi magnetik.

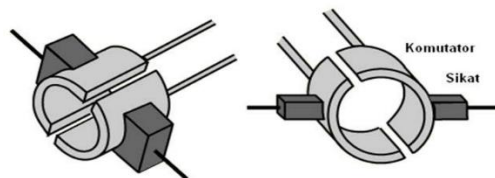


Gambar 10. 8. Konstruksi kutub dan penempatannya.

### 10.3.3 Sikat

**Sikat** adalah **jembatan bagi aliran arus ke lilitan jangkar**. Dimana permukaan sikat ditekan ke permukaan segmen komutator untuk menyalurkan arus listrik. Sikat memegang peranan penting untuk terjadinya komutasi. Sikat-sikat terbuat dari bahan karbon dengan tingkat

kekerasan yang bermacam-macam dan dalam beberapa hal dibuat dari campuran karbon dan logam tembaga. Sikat harus lebih lunak daripada segmen-segmen komutator supaya gesekan yang terjadi antara segmen-segmen komutator dan sikat tidak mengakibatkan ausnya komutator.



Gambar 10. 9. Sikat pada motor dc.

#### 10.3.4 Kumaran Medan

**Kumaran medan** adalah susunan konduktor yang dibelitkan pada inti kutub. Dimana konduktor tersebut terbuat dari kawat tembaga yang berbentuk bulat ataupun persegi. **Rangkaian medan yang berfungsi untuk menghasilkan fluksi utama dibentuk dari kumaran pada setiap kutub.** Pada aplikasinya rangkaian medan dapat dihubungkan dengan kumaran jangkar baik seri maupun paralel dan juga dihubungkan tersendiri langsung kepada sumber tegangan sesuai dengan jenis penguatan pada motor.

#### 10.3.5 Kumaran Jangkar

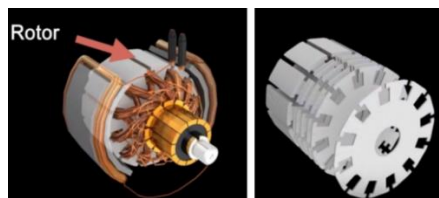
**Kumaran jangkar** pada motor arus searah merupakan **tempat dibangkitkannya ggl induksi.** Pada motor arus searah penguatan kompon pendek kumaran medan serinya diparalel terhadap kumaran jangkar, sedangkan pada motor arus searah penguatan kompon panjang kumaran medan serinya diserikan terhadap kumaran jangkar. Konstruksi kumaran jangkar pada rotor ada tiga macam yaitu:

- a. **Kumaran jerat (*lap winding*)**
- b. **Kumaran gelombang (*wave winding*)**
- c. **Kumaran zig-zag (*frog-leg winding*)**

#### 10.3.6 Inti Jangkar

**Inti jangkar** yang umumnya digunakan dalam motor arus searah adalah berbentuk silinder yang diberi alur-alur pada permukaannya untuk

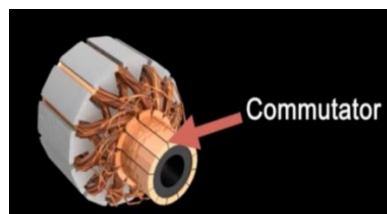
tempat melilitkan kumparan jangkar tempat terbentuknya ggl induksi. Inti jangkar terbuat dari bahan ferromagnetik, dengan maksud agar komponen-komponen (lilitan jangkar) terletak dalam daerah yang induksi magnetnya besar supaya ggl induksi dapat bertambah besar. Bahan yang digunakan untuk jangkar ini merupakan sejenis campuran baja silicon. Seperti halnya inti kutub magnet maka jangkar dibuat dari bahan berlapis-lapis tipis dengan tujuan untuk mengurangi panas yang terbentuk karena adanya arus linier seperti ditunjukkan pada Gambar 10.10.



Gambar 10. 10. Inti jangkar yang berlapis-lapis.

### 10.3.7 Komutator

Untuk memperoleh tegangan searah diperlukan alat penyearah yang disebut *komutator dan sikat*. Fungsi komutator untuk fasilitas penghubung arus dari konduktor jangkar, sebagai penyearah mekanik, yang bersama-sama dengan sikat membuat sesuatu kerjasama yang disebut **KOMUTASI**. Komutator terdiri dari sejumlah segmen tembaga yang berbentuk lempengan-lempengan yang dirakit ke dalam silinder yang terpasang pada poros. Di mana tiap-tiap lempengan atau segmen-segmen komutator terisolasi dengan baik antara satu sama lainnya. Bahan isolasi yang digunakan pada komutator adalah mika. Agar dihasilkan tegangan arus searah yang konstan, maka komutator yang digunakan hendaknya dalam jumlah yang besar.



Gambar 10. 11. Komutator.

### 10.3.8 Celah Udara

**Celah udara** merupakan ruang atau celah antara permukaan jangkar dengan permukaan sepatu kutub yang menyebabkan jangkar tidak bergesekan dengan sepatu kutub.

## 10.4 Prinsip Kerja Motor Arus Searah

**Prinsip kerja motor arus searah** berdasarkan pada **penghantar yang membawa arus ditempatkan dalam suatu medan magnet** maka pada penghantar tersebut akan mengalami **gaya**.

**Gaya** menimbulkan **torsi** yang akan menghasilkan **rotasi mekanik**, sehingga *motor akan berputar*. Jadi motor arus searah ini menerima sumbangan arus searah dari jala-jala kemudian diubah menjadi energi mekanik berupa perputaran, yang akan dipakai oleh peralatan lain.

Singkatnya, **prinsip kerja dari motor membutuhkan:**

1. **Adanya garis-garis gaya medan magnet (fluks)**, antara kutub yang berada di stator.
2. **Penghantar yang dialiri arus** ditempatkan pada jangkar yang berada dalam medan magnet tadi.
3. Pada penghantar timbul **gaya** yang menghasilkan **torsi**.

Arah dari garis-garis gaya (fluks) medan magnet yang dihasilkan oleh kutub, arah arus yang mengalir pada penghantar dan arah dari gaya, **salingsaling tegak lurus** serta menurut hukum tangan kiri Fleming.

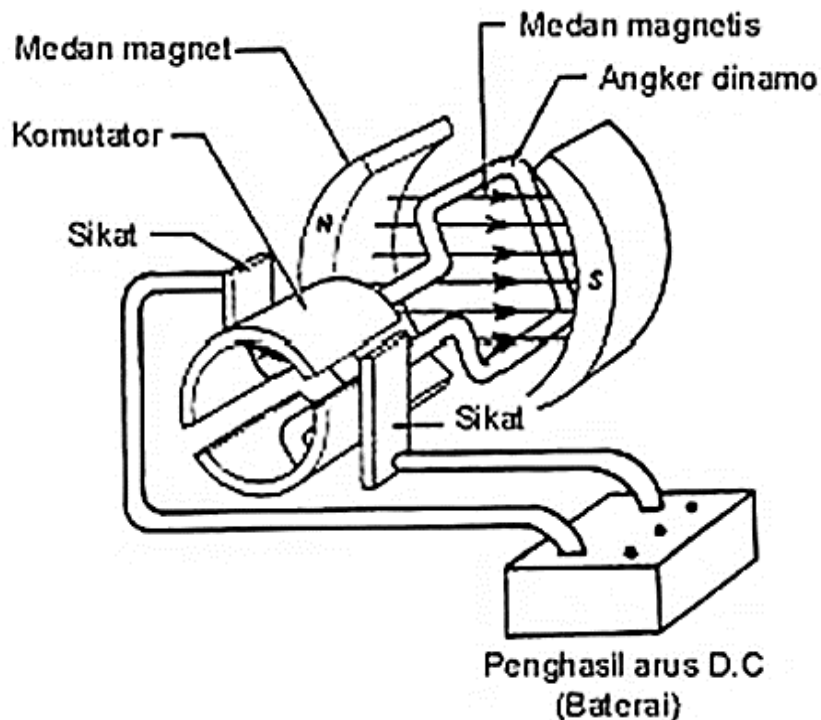
Gaya yang dihasilkan oleh arus yang mengalir pada penghantar yang ditempatkan dalam suatu medan magnet tergantung dari hal-hal berikut:

1. Kuatnya medan magnet,
2. Besarnya arus melalui penghantar,
3. Panjang kawat yang membawa arus.

Motor dc memerlukan suplai tegangan yang searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi mekanik. **Kumparan medan pada motor dc** disebut **stator** (bagian yang tidak berputar) dan **kumparan jangkar** disebut **rotor** (bagian yang berputar). Jika terjadi putaran pada kumparan jangkar dalam pada medan magnet, maka akan timbul tegangan (*GGL*) yang berubah-ubah arah pada setiap setengah putaran, sehingga merupakan tegangan bolak-balik.

**Prinsip kerja dari arus searah** adalah **membalik fasa tegangan dari gelombang yang mempunyai nilai positif dengan menggunakan**

**komutator**, dengan demikian arus yang berbalik arah dengan kumparan jangkar yang berputar dalam medan magnet. Bentuk motor paling sederhana memiliki kumparan satu lilitan yang bisa berputar bebas di antara kutub-kutub magnet permanen. Prinsip kerja motor dc sangat mirip dengan mesin linier sederhana.

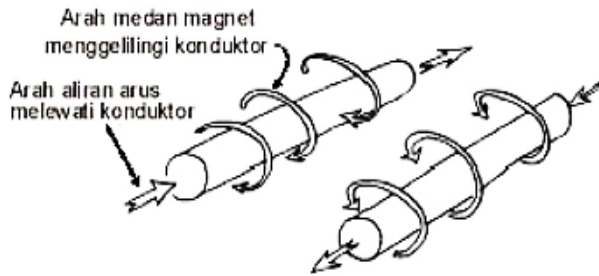


Gambar 10. 12. Motor dc sederhana.

Catu tegangan dc dari baterai menuju ke lilitan melalui sikat yang menyentuh komutator, dua segmen yang terhubung dengan dua ujung lilitan. Kumparan satu lilitan pada gambar di atas disebut angker dinamo. **Angker dinamo** adalah sebutan untuk komponen yang berputar di antara medan magnet.

#### 10.4.1 Prinsip Dasar Cara Kerja

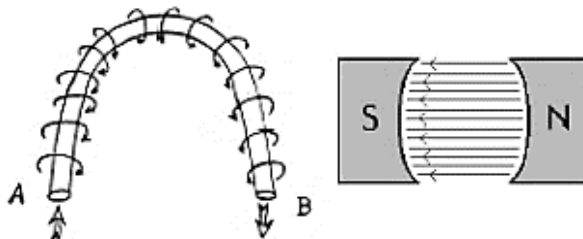
Jika arus lewat pada suatu konduktor, timbul medan magnet di sekitar konduktor. Arah medan magnet ditentukan oleh arah aliran arus pada konduktor.



Gambar 10. 13. Medan magnet yang membawa arus mengelilingi konduktor.

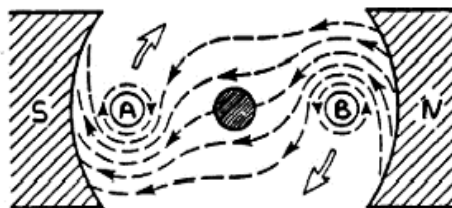
**Aturan Genggaman Tangan Kanan** bisa dipakai untuk menentukan arah garis fluks di sekitar konduktor.

Medan magnet hanya terjadi di sekitar sebuah konduktor jika ada arus mengalir pada konduktor tersebut. Pada motor listrik konduktor berbentuk **U** disebut **angker dinamo**.



Gambar 10. 14. Medan magnet mengelilingi konduktor dan diantara kutub.

Jika konduktor berbentuk **U** (**angker dinamo**) diletakkan di antara kutub utara dan selatan yang kuat medan magnet konduktor akan berinteraksi dengan medan magnet kutub.



Gambar 10. 15. Reaksi garis fluks.

Lingkar bertanda **A** dan **B** merupakan ujung konduktor yang dilengkungkan (*looped conductor*). Arus mengalir masuk melalui ujung **A** dan keluar melalui ujung **B**.

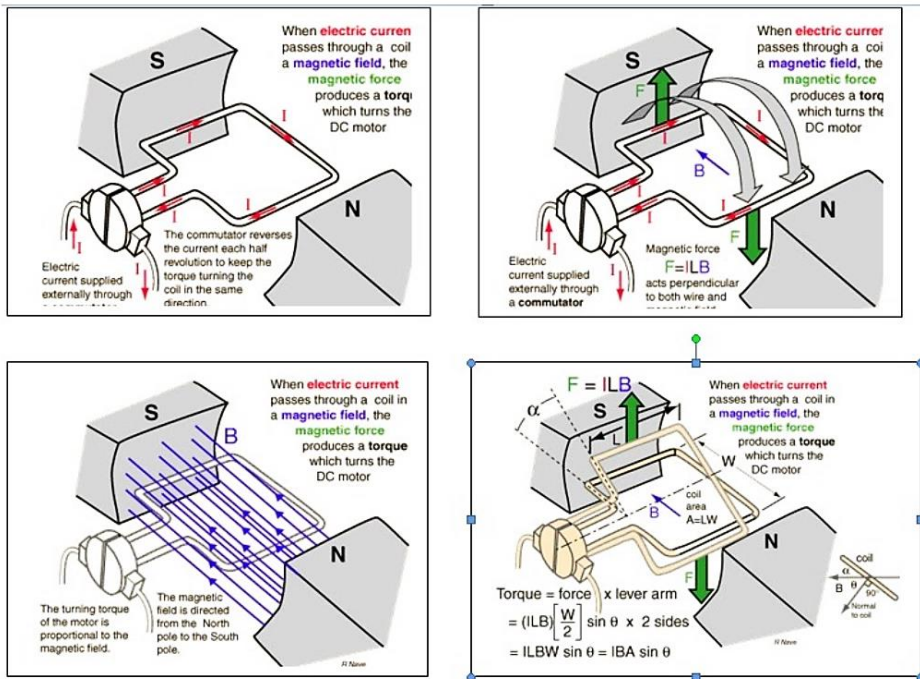
**Medan konduktor A** yang searah jarum jam akan menambah medan pada kutub dan menimbulkan medan yang kuat di bawah konduktor. Konduktor akan berusaha bergerak ke **atas** untuk keluar dari medan kuat ini. Medan konduktor **B** yang berlawanan arah jarum jam akan menambah medan pada kutub dan menimbulkan medan yang kuat di atas konduktor. Konduktor akan berusaha untuk bergerak **turun** agar keluar dari medan yang kuat tersebut. Gaya-gaya tersebut akan membuat angker dinamo berputar searah jarum jam.

#### **Mekanisme kerja untuk seluruh jenis motor secara umum :**

- **Arus listrik** dalam **medan magnet** akan memberikan **gaya**.
- Jika kawat yang membawa arus dibengkokkan menjadi sebuah lingkaran / loop, maka kedua sisi loop, yaitu pada sudut kanan medan magnet, akan mendapatkan **gaya pada arah yang berlawanan**.
- **Pasangan gaya** menghasilkan **tenaga putar / torque** untuk **memutar kumparan**.
- **Motor-motor memiliki beberapa loop** pada dinamonya untuk memberikan tenaga putaran yang lebih seragam dan medan magnetnya dihasilkan oleh susunan elektromagnetik yang disebut **kumparan medan**.

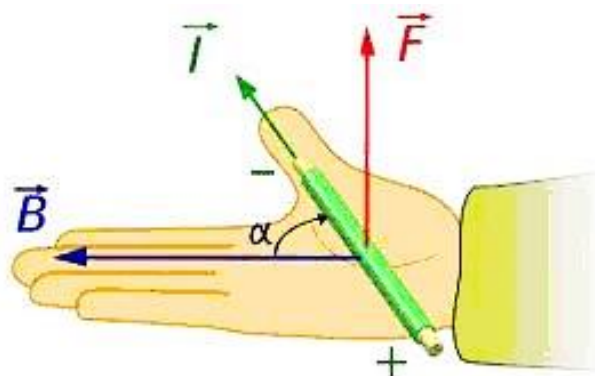
Pada motor dc, daerah kumparan medan yang dialiri arus listrik akan menghasilkan medan magnet yang melingkupi kumparan jangkar dengan arah tertentu. Konversi dari energi listrik menjadi energi mekanik (motor) maupun sebaliknya berlangsung melalui medan magnet, dengan demikian medan magnet disini selain berfungsi sebagai tempat untuk menyimpan energi, sekaligus sebagai tempat berlangsungnya proses perubahan energi.

Agar proses perubahan energi mekanik dapat berlangsung secara sempurna, maka tegangan sumber harus lebih besar daripada tegangan gerak yang disebabkan reaksi lawan. Dengan memberi arus pada kumparan jangkar yang dilindungi oleh medan maka menimbulkan perputaran pada motor.



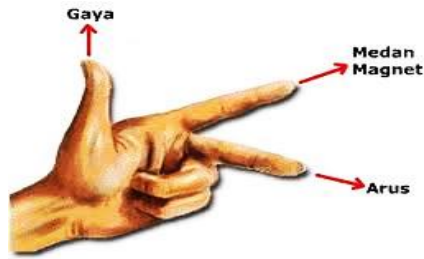
Gambar 10. 16. Prinsip kerja motor arus searah.

Arah medan magnet yang dihasilkan oleh konduktor dapat diperoleh dengan menggunakan kaidah tangan kanan. Untuk lebih jelasnya perhatikan Gambar 10.17 berikut ini.



Gambar 10. 17. Kaidah tangan kanan.

Prinsip kerja sebuah motor arus searah dapat dijelaskan dengan Gambar 10.18.

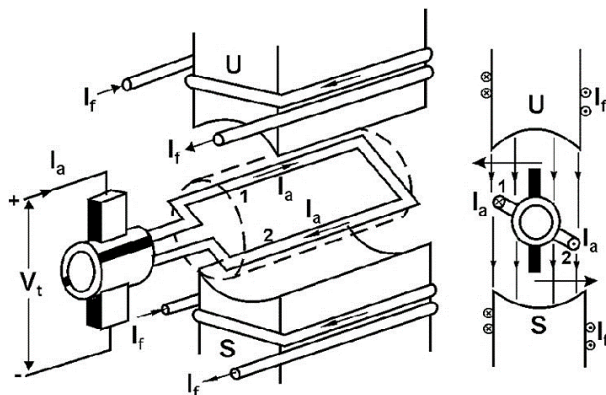


Gambar 10. 18. Prinsip perputaran motor arus searah.

Saat kumparan medan dihubungkan dengan sumber tegangan, mengalir arus medan  $I_f$  pada kumparan medan karena rangkaian tertutup sehingga menghasilkan fluksi magnet yang arahnya dari kutub utara menuju kutub selatan.

Sedangkan pada kumparan jangkar mengalir arus jangkar  $I_a$ , sehingga pada konduktor kumparan jangkar timbul fluksi magnet yang melingkar. **Fluksi jangkar ini akan memotong fluksi dari kumparan medan** sehingga menyebabkan perubahan kerapatan fluksi dari medan utama. Hal ini menyebabkan **jangkar mengalami gaya** sehingga menimbulkan torsi.

**Gaya** yang dihasilkan pada setiap konduktor dari sebuah jangkar, merupakan **akibat aksi gabungan medan utama dan medan di sekeliling konduktor**. **Gaya** yang dihasilkan **berbanding lurus dengan besar fluksi medan utama dan kuat medan di sekeliling konduktor**. Medan di sekeliling masing-masing konduktor jangkar tergantung pada besarnya arus jangkar yang mengalir pada konduktor tersebut. Arah gaya ini dapat ditentukan dengan kaidah tangan kiri.



Gambar 10. 19. Aturan tangan kiri untuk prinsip kerja motor dc.

Besarnya gaya  $F = B I \ell \sin \theta$ , karena arus jangkar  $I$  tegak lurus dengan arah induksi magnetik  $B$  maka besar gaya yang dihasilkan oleh arus yang mengalir pada konduktor jangkar yang ditempatkan dalam suatu medan magnet adalah:

$$F = B \cdot I \cdot \ell \quad \text{Newton} \quad (1)$$

dimana :

$F$  = gaya Lorentz [Newton]

$I$  = arus [Ampere]

$\ell$  = panjang penghantar [meter]

$B$  = kerapatan fluksi [Weber/m<sup>2</sup>]

Dari percobaan didapatkan bahwa gaya 1 dyne dihasilkan oleh penghantar dengan panjang 1 cm yang membawa arus 10 Ampere, bila ditempatkan dibawah kutub yang luas permukaannya 1 cm<sup>2</sup>. Analisis ini akan memberikan suatu persamaan:

$$F' = \frac{B' \times I' \times \ell}{10} \quad \text{dyne} \quad (2)$$

Jika unit-unit  $F'$ ,  $B'$ , dan  $I'$  ditentukan oleh istilah yang lebih praktis yakni masing-masing dalam pound (lb), garis gaya per inch<sup>2</sup> maka persamaan diatas menjadi sebagai berikut:

$$F = \frac{(B/6,45) \times I \times (1 \times 2,54)}{10 \times 980 \times 453,6}$$

$$F = \frac{B \times I \times \ell}{11.300.000} \quad \text{lb} \quad (3)$$

dengan:

$B$  = kerapatan fluks, dalam garis-garis gaya fluks per inch<sup>2</sup>.

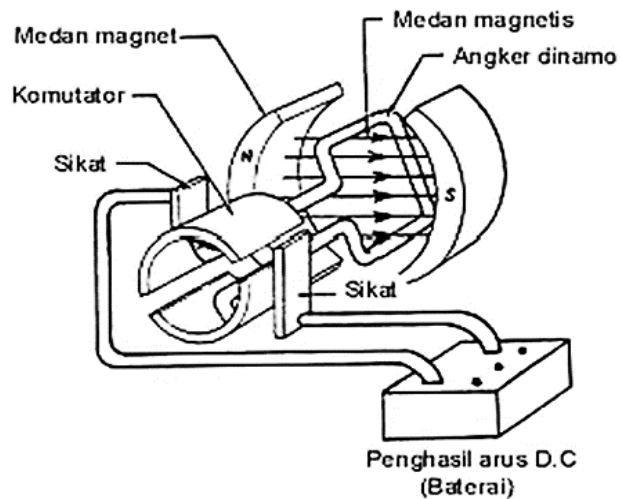
$I$  = arus yang mengalir pada penghantar jangkar dalam amper.

$\ell$  = panjang dari penghantar, dalam inch.

## 10.5 Soal Latihan

1. Jelaskan prinsip kerja motor arus searah?
2. Jelaskan jenis-jenis motor arus searah?
3. Supaya motor arus searah dapat berputar; harus membangkit torsi, tergantung dari apakah torsi tersebut?

4. Apakah yang dimaksud dengan torsi jangkar motor dan torsi poros motor arus searah?
5. Jelaskan komponen-komponen konstruksi motor linier pada Gambar 10.20 berikut ini. Juga jelaskan fungsi dari masing-masing komponen tersebut.



Gambar 10. 20. Komponen-komponen konstruksi motor linier.

# BAB 11

## MOTOR ARUS SEARAH (DC)

### RANGKAIAN EKIVALEN DAN PENGATURAN

#### 11.1 Pendahuluan

Motor arus searah banyak digunakan untuk menghasilkan tenaga mekanik berupa kecepatan atau perputaran, baik untuk mesin-mesin produksi di pabrik dan di industri maupun untuk traksi, tram listrik dan sebagainya. Untuk traksi, tram listrik sampai sekarang masih banyak menggunakan motor arus searah, demikian pula untuk start awal dari mobil, dan rangkaian peralatan elektronik.

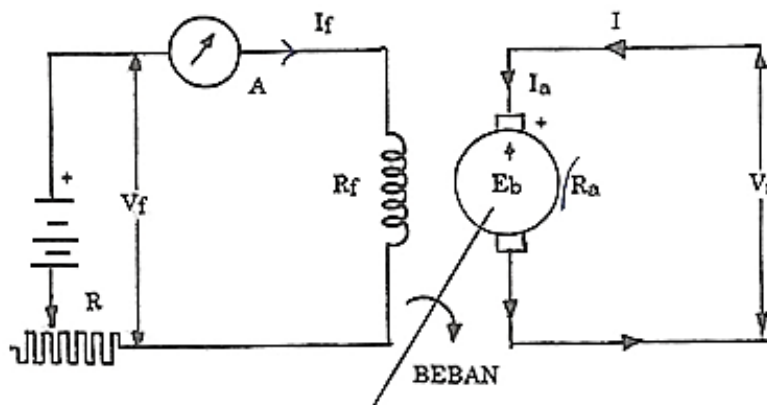
#### 11.2 Jenis Motor Arus Searah

Jenis motor arus searah sama dengan jenis generator arus searah. Sebenarnya motor arus searah dapat dipakai sebagai generator dan juga sebaliknya.

##### 11.2.1 Motor arus searah berpenguatan bebas

Pada jangkar motor timbul  $EMF$  ( $GGL$ ) lawan sebesar  $E_b$  yang melawan tegangan masuk  $V_t$ .

Rangkaian ekivalen motor arus searah berpenguatan bebas pada Gambar 11.1 berikut ini.



Gambar 11. 1. Rangkaian ekivalen motor arus searah berpenguatan bebas.

Dari gambar rangkaian ekivalen tersebut maka persamaan yang menyatakan hubungan besaran tegangan, arus, daya dan resistans dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V_t = E_b + I_a R_a + \Delta v_{si} \quad (1)$$

$$I = I_a \quad (2)$$

$$I_f = \frac{V_f}{R + R_f} \quad (3)$$

$$I = \frac{\text{Daya input}}{V_t} \quad (4)$$

Keterangan persamaan diatas,

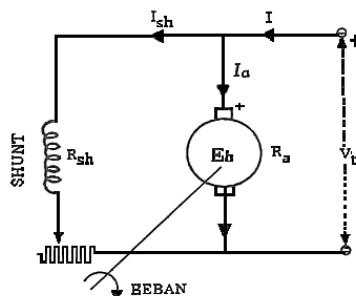
- $V_t$  = **Tegangan terminal** dalam volt.
- $E_b$  = **EMF (GGL) lawan** dalam volt.
- $I$  = **Arus dari jala-jala** dalam Amper.
- $I_a$  = **Arus jangkar** dalam Amper.
- $I_f$  = **Arus medan** dalam Amper.
- $V_f$  = **Tegangan penguat** dalam volt.
- $R_f$  = **Resistansi medan** dalam ohm.
- $R_a$  = **Resistansi jangkar** dalam ohm.
- $R$  = **Resistansi pengatur arus medan** dalam ohm.
- $\Delta v_{si}$  = **Rugi tegangan pada sikat.**

### 11.2.2 Motor arus searah berpenguatan sendiri

Jenis-jenis motor ini sebagai berikut :

#### A. Motor arus searah shunt

Rangkaian ekivalen motor arus searah shunt diperlihatkan dalam Gambar 11.2.



Gambar 11. 2. Rangkaian ekivalen motor arus searah shunt.

Dari rangkaian ekivalen motor arus searah shunt tersebut diatas, persamaan yang menyatakan hubungan antara tegangan, arus, daya dan resistans adalah sebagai berikut:

$$V_t = E_b + I_a R_a + \Delta v_{si} \quad (5)$$

$$I_{sh} = I_f = \frac{V_t}{R_{sh}} \quad (6)$$

$$I = I_a + I_{sh} \quad (7)$$

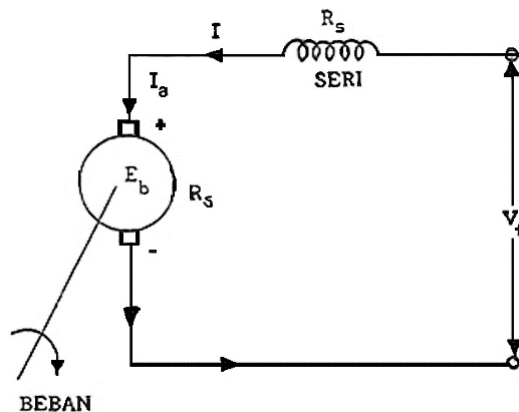
$$I = \frac{\text{Daya input}}{V_t} \quad (8)$$

dengan,

- $V_t$  = **Tegangan terminal** dalam volt.
- $E_b$  = **EMF (GGL) lawan** dalam volt.
- $I_a$  = **Arus jangkar** dalam Amper.
- $R_a$  = **Resistansi kumparan jangkar** dalam ohm.
- $I_{sh}$  = **Arus medan shunt** dalam Amper.
- $I$  = **Arus jala-jala** dalam Amper.
- $P_i$  = **Daya input**  $V_1 \times I$  dalam Watt.
- $\Delta v_{si}$  = **Rugi tegangan pada sikat.**

## B. Motor arus searah seri

Rangkaian ekivalen motor arus searah seri seperti diperlihatkan dalam Gambar 11.3.



Gambar 11. 3. Rangkaian ekivalen motor arus searah seri.

$$V_t = E_b + I_a R_a + I R_s + \Delta v_{si} \quad (9)$$

$$I = I_a \quad (10)$$

$$I = \frac{P_{input}}{V_t} \quad (11)$$

Keterangan persamaan (9) sampai persamaan (11) diatas,

$V_t$  = **Tegangan terminal motor** dalam volt.

$E_b$  = **EMF (GGL) lawan dari jangkar** dalam volt.

$I_a$  = **Arus jangkar** dalam Amper.

$I$  = **Arus dari jala-jala** dalam Amper.

$R_a$  = **Resistansi kumparan jangkar** dalam ohm.

$R_s$  = **Resistansi kumparan medan seri** dalam ohm.

$\Delta v_{si}$  = **Rugi tegangan pada sikat.**

### C. Motor arus searah kompon

Motor arus searah kompon ini, berdasarkan susunan rangkaian kumparan medan, sama seperti pada generator, terbagi atas:

#### 1). Motor arus searah kompon pendek

Rangkaian ekivalen motor arus searah kompon pendek pada Gambar 11.4. Persamaan yang menyatakan hubungan arus, tegangan, daya dan resistansi akan mengikuti persamaan berikut:

$$V_t = E_b + I_a R_a + I R_s + \Delta v_{si} \quad (12)$$

dengan,

$V_t$  = **Tegangan terminal motor** dalam volt.

$E_b$  = **EMF (GGL) lawan dari jangkar** dalam volt.

$I_a$  = **Arus jangkar** dalam Amper.

$I$  = **Arus dari jala-jala** dalam Amper.

$I_{sh}$  = **Arus pada medan shunt** dalam Amper.

$R_a$  = **Resistansi kumparan jangkar** dalam ohm.

$R_s$  = **Resistansi kumparan medan seri** dalam ohm.

$R_{sh}$  = Resistansi kumparan medan shunt dalam ohm.

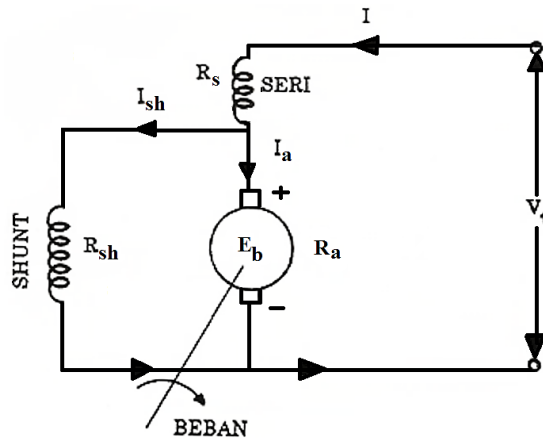
$\Delta v_{si}$  = Rugi tegangan pada sikat.

Daya input ( $P_i$ ) =  $V_t \times I$  dalam watt.

$$I_a = I - I_{sh} \quad (13)$$

$$I = \frac{\text{Daya input}}{V_t} \quad (14)$$

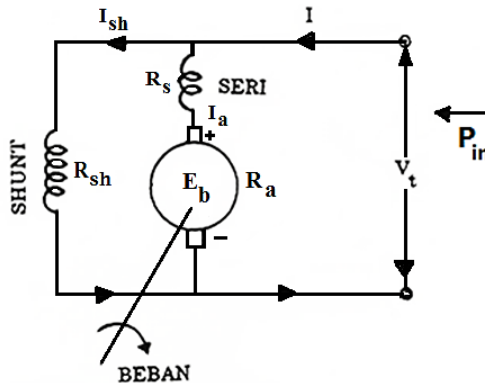
$$I_{sh} = \frac{V_t - I R_s}{R_{sh}} \quad (15)$$



Gambar 11. 4. Rangkaian ekivalen motor arus searah kompon pendek.

## 2). Motor arus searah kompon panjang

Rangkaian ekivalen motor arus searah kompon panjang pada Gambar 11.5.



Gambar 11. 5. Rangkaian ekivalen motor arus searah kompon panjang.

Dari gambar rangkaian ekivalen tersebut persamaan yang menyatakan hubungan arus, tegangan, daya dan resistansi akan mengikuti persamaan berikut:

$$V_t = E_b + I_a R_a + I_a R_s + \Delta v_{si} \quad (16)$$

$$I_a = I - I_{sh} \quad (17)$$

$$I = \frac{\text{Daya input}}{V_t} \quad (18)$$

$$I_{sh} = \frac{V_t}{R_{sh}} \quad (19)$$

Keterangan persamaan (16) sampai (19),

- $V_t$  = **Tegangan terminal motor** dalam volt.
- $E_b$  = **EMF (GGL) lawan dari jangkar** dalam volt.
- $I_a$  = **Arus jangkar** dalam Amper.
- $I$  = **Arus dari jala-jala** dalam Amper.
- $I_{sh}$  = **Arus pada medan shunt** dalam Amper.
- $R_a$  = **Resistansi kumparan jangkar** dalam ohm.
- $R_s$  = **Resistansi kumparan medan seri** dalam ohm.
- $R_{sh}$  = **Resistansi kumparan medan shunt** dalam ohm.
- $\Delta v_{si}$  = **Rugi tegangan pada sikat.**

### Contoh Soal 1.

Suatu motor arus searah kompon panjang dengan daya input 300 kW, tegangan terminal 600 volt, mempunyai resistansi medan shunt 75 ohm, resistansi jangkar termasuk resistansi sikat sebesar 0,41 ohm, resistansi medan seri 0,012 ohm dan resistansi yang diparalel dengan medan seri sebesar 0,036 ohm. Hitunglah:

- a. Arus jangkar.
- b. **EMF (GGL)** lawan yang dibangkitkan oleh jangkar.
- c. Daya output yang dibangkitkan oleh jangkar.

### Penyelesaian:

Dari rangkaian ekivalen motor arus searah kompon panjang pada Gambar 11.5, parameternya sebagai berikut,

$$P_{in} = 300 \text{ kW} ; V_t = 600 \text{ volt} ; R_{sh} = 75 \text{ ohm}$$

$R_s = 0,012 \text{ ohm}$  ; dan resistansi yang diparalel dengan  $R_s$  yakni  $R_D = 0,036 \text{ ohm}$

Resistansi jangkar termasuk sikat = 0,41 ohm

Resistansi medan seri  $R_{s'}$  diparalel dengan  $R_{o'}$

$$\text{harganya} = \frac{0,012 \times 0,36}{0,012 + 0,036} = 0,009 \text{ ohm}$$

$$I = \frac{300.000}{600} = 500 \text{ Amper}$$

$$I_{sh} = \frac{600}{75} = 8 \text{ Amper}$$

a.  $I_a = I - I_{sh} = 500 - 8 = 492 \text{ Amper}$

Jatuh tegangan pada medan seri =  $492 \times 0,009 = 4,5 \text{ volt}$

Jatuh tegangan pada jangkar dan sikat =  $492 \times 0,41 = 201,72 \text{ volt}$ .

b.  $E_b = 600 - 201,72 - 4,5 = 393,78 \text{ volt}$

c. Daya output yang dibangkitkan oleh jangkar:

$$P_{output} = E_b \times I_a$$

$$P_{output} = 393,78 \times 492 = 193,74 \text{ kW}$$

### 11.3 Torsi Motor Arus Searah

Torsi yang dibangkitkan oleh motor arus searah yang cenderung memutar jangkarnya tergantung pada:

a. Fluks yang dihasilkan oleh kutub utama,  $\phi$

b. Arus yang mengalir pada belitan jangkar,  $I_a$ .

Sehingga dapat ditulis secara umum torsi tersebut,

$$T = k \cdot \phi \cdot I_a \quad \text{lb-ft} \quad (20)$$

dengan,

$T$  = Torsi dalam lb-ft.

$\phi$  = Fluks per kutub dalam maxwell.

$k$  = Konstanta yang didapatkan dengan persamaan berikut,

$$k = \left[ \frac{0,1173}{10^8} \right] \left[ \frac{p \times Z}{a} \right] \quad (21)$$

dengan,

$p$  = Banyaknya kutub.

$Z$  = Jumlah total penghantar jangkar.

$a$  = Jumlah garis edar paralel belitan jangkar.

Fluks yang dihasilkan oleh kutub utama dan arus yang mengalir pada belitan jangkar akan menghasilkan gaya. Jika diandaikan penampang jangkar dengan jari-jari  $r$  meter dan gaya yang cenderung memutar jangkar tersebut adalah  $F$  Newton serta kecepatan jangkar dalam  $N$  rps (Hz), maka persamaan torsi jangkar  $T_a$  akan mengikuti persamaan berikut:

$$T_a = F \times r \quad \text{Newton} - \text{meter} \quad (N - m) \quad (22)$$

Pada satu kali putaran gaya  $F$  akan menghasilkan kerja sebesar  $F \times 2\pi r$  Joule sehingga daya mekanik ( $P_m$ ) yang dibangkitkan oleh jangkar untuk  $N$  rps (*revolution per second*, atau Hz) sebesar:

$$P_m = F \times 2\pi r \times N \quad \text{Joule/detik}$$

$$P_m = (F \times r) \times 2\pi N \quad \text{Joule/detik}$$

$$P_m = T_a \times \omega \quad \text{watt} \quad (23)$$

Jika torsi yang dibangkitkan oleh motor besarnya dalam *lb-ft* dan motor bekerja dengan “kecepatan  $N$  dalam rpm” maka daya mekaniknya dapat dinyatakan dalam besaran daya kuda (*horse power = hp*) yang hubungannya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P_m = \frac{T \times \omega}{33.000} \quad \text{hp}$$

$$P_m = \frac{T \times 2\pi N}{33.000} \quad \text{hp} \quad (N \text{ dalam rpm}) \quad (24)$$

Daya yang dibangkitkan oleh jangkar motor yang berubah menjadi daya mekanik juga tergantung dari *EMF (GGL) lawan dan arus jangkarnya*, sehingga dapat dituliskan:

$$P_m = T_a \times \omega = T_a \times 2\pi N = E_b I_a$$

$$T_a = \frac{E_b I_a}{2\pi N} \quad \text{Newton} - \text{m} = 0,159 \frac{E_b I_a}{N} \quad \text{Newton} - \text{m} \quad (25)$$

**Torsi jangkar**  $T_a$  tersebut tidak semuanya untuk memutar mesin-mesin produksi, sebagian untuk melayani rugi-rugi angin dan geseran.

**Torsi yang bersih pada poros motor** disebut *torsi poros*  $T_{sh}$ , yang nantinya dipakai untuk memutar peralatan atau mesin produksi pada pabrik maupun industri. *Daya kuda (horse power)* yang ditimbulkan oleh

**torsi poros** disebut *Brake Horse Power (BHP)* atau disebut **Daya rem** yang dapat dituliskan persamaannya, berikut:

$$BHP = \frac{T_{sh} \times 2\pi N}{746}$$

$$T_{sh} = \frac{746 \times BHP}{2\pi N} = \frac{\text{Output bersih dalam watt}}{2\pi N} \text{ Newton-m} \quad (26)$$

### Contoh Soal 2.

Motor arus searah 4 kutub mempunyai penghantar jangkar total sebesar 828 fluks per kutub  $1,93 \times 10^5$  maxwell.

Arus jangkar total 40 Ampere, garis edar paralel 2.

### Hitung:

- Torsi yang dibangkitkan motor dalam lb-ft.
- HP outputnya, jika kecepatan 1750 rpm

### Penyelesaian:

- Torsi yang dibangkitkan motor dalam lb-ft:

$$T = k \cdot \phi \cdot I_a = \frac{0,1173}{10^8} \left[ \frac{p \times Z}{a} \right] \cdot \phi \cdot I_a$$

$$T = \frac{0,1173}{10^8} \times \left[ \frac{4 \times 828}{2} \right] \times 1,93 \times 10^5 \times 40$$

$$T = 15 \text{ lb} - \text{ft}$$

- Daya output dalam hp:

$$P_m = \frac{T \times 2\pi N}{33.000} = \frac{15 \times 2\pi \times 1750}{33.000} = 5 \text{ hp}$$

### Contoh Soal 3.

Motor shunt 500 volt, 50 BHP (37,3 kW), 1000 rpm dibebani penuh dengan efisiensi 90%. Resistansi rangkaian jangkar 0,24 ohm, rugi tegangan pada seluruh sikat 2 volt, arus pada medan shunt 1,8 Ampere.

**Hitunglah:**

- Arus beban penuh dari jala-jala.
- Torsi poros pada waktu beban penuh.
- Resistansi yang diseri pada jangkar motor waktu start, sehingga arus start tidak melebihi 1,5 kali arus beban penuh dari jala-jala.

**Penyelesaian:**

a. Efisiensi motor =  $\frac{\text{Daya output}}{\text{Daya input}}$

$$\text{Daya input} = \frac{\text{Daya output}}{\text{Efisiensi}} = \frac{37.300}{0,9} = 41,444 \text{ watt}$$

$$\text{Arus beban penuh dari jala-jala } I = \frac{41,444}{500} = 82,9 \text{ Ampere}$$

- b. Torsi poros pada waktu beban penuh:

$$T_{sh} = \frac{\text{output}}{2\pi N} = \frac{37.300}{2\pi (1000/60)} = 356 \text{ N - m}$$

- c. Arus start dari jala-jala,

$$I = 1,5 \times 82,9 = 124,35 \text{ Ampere}$$

Arus jangkar pada waktu start:

$$I_a = I - I_{sh} = 124,35 - 1,8 = 122,5 \text{ Ampere}$$

Untuk membatasi arus start dipasang resistansi  $R$  yang diseri dengan jangkar.

Besarnya:

$$I_a (R + R_a) + \Delta v_{si} = V_t$$

$$122,55 (R + 0,24) + 2 = 500 \rightarrow R = 3,824 \text{ ohm}$$

**Contoh Soal 4.**

Motor arus searah seri 220 volt menarik arus dari jala-jala sebesar 40 Ampere dengan kecepatan 800 rpm.

Jika resistansi jangkar dan resistansi medan seri masing-masing 0,2 ohm dan 0,1 ohm, rugi-rugi besi serta rugi angin dan geseran 0,5 kW.

**Hitung:**

- Torsi yang dibangkitkan oleh jangkar.
- Output motor.

### Penyelesaian:

Pada motor seri  $\rightarrow I = I_a$ , arus jala-jala = arus jangkar.

a. Torsi yang dibangkitkan oleh jangkar:

$$E_b = V_t - I_a (R_a + R_s) = 220 - 40 (0,2 + 0,1) = 208 \text{ volt}$$

$$T_a = \frac{208 \times 40}{2\pi (800/60)} = 99,3 \text{ N} - m$$

b. Output motor dihitung sebagai berikut,

**Rugi tembaga jangkar dan medan seri,**

$$I_a^2 (R_a + R_s) = 40^2 \times 0,3 = 480 \text{ watt}$$

Rugi besi + rugi angin dan geseran = 500 watt

$$\text{Rugi-rugi total} = 500 + 480 = 980 \text{ watt}$$

$$\text{Daya input motor} = 220 \times 40 = 8800 \text{ watt}$$

$$\text{Daya output motor} = 8800 - 980 = 7,82 \text{ kW}$$

### Contoh Soal 5.

Motor arus searah shunt 4 kutub membangkitkan torsi 20 **lb-ft**, fluks per kutub 700.000 maxwell, jika belitan jangkar mempunyai penghantar 264 dengan garis edar paralel dari arus jangkar adalah 2, hitunglah:

a. Arus jangkar total.

b. Daya mekanik dalam hp bila kecepatan 1300 rpm.

### Penyelesaian:

$$a. T = k \cdot \phi \cdot I = \left[ \frac{0,1173}{10^8} \right] \left[ \frac{P \times Z}{a} \right] \times \phi \times I_a$$

$$20 = \left[ \frac{0,1173}{10^8} \right] \left[ \frac{4 \times 264}{2} \right] \times 700.000 \times I_a$$

$$I_a = 46 \text{ Ampere}$$

b. Daya mekanik dalam hp:

$$P_m = \frac{2\pi N \times T}{33.000} = \frac{2\pi \times 1300 \times 20}{33.000} = 5 \text{ hp}$$

## 11.4 Kecepatan Motor Arus Searah

Secara umum untuk motor arus searah berlaku persamaan EMF (GGL) lawan, yang ada hubungannya dengan kecepatan sebagai berikut:

$$E_b = k \cdot \phi \cdot N \quad (27)$$

atau,

$$N = \frac{E_b}{k \cdot \phi} \quad (28)$$

dengan:

$N$  = **Kecepatan motor** dalam rpm.

$E_b$  = **EMF (GGL) lawan yang dibangkitkan oleh jangkar** dalam volt.

$\phi$  = **Fluks per kutub** dalam maxwell.

$k$  = **Konstanta** yang sama dengan konstanta di persamaan (21).

**EMF (GGL) lawan** pada persamaan tersebut tergantung pada rangkaian ekuivalen dari masing-masing motor, sehingga tingkat kecepatan serta regulasi pada motor dapat dituliskan :

#### a. Motor arus searah shunt

Pada tingkat kecepatan pertama diandaikan:

$$N_1; E_{b1} \text{ dan } \phi_1 \text{ maka } N_1 = \frac{E_{b1}}{k \cdot \phi_1}$$

Pada tingkat kecepatan kedua diandaikan:

$$N_2; E_{b2} \text{ dan } \phi_2 \text{ maka } N_2 = \frac{E_{b2}}{k \cdot \phi_2}$$

Perbandingan kecepatan motor shunt :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \times \frac{\phi_1}{\phi_2} \quad (29)$$

Seandainya fluksnya tetap,  $\phi_1 = \phi_2$  maka perbandingan kecepatannya menjadi:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \quad (30)$$

#### b. Motor arus searah seri

Sama halnya dengan motor arus searah shunt maka perbandingan kecepatan untuk motor arus searah seri adalah berikut :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \times \frac{\phi_1}{\phi_2}$$

Karena fluksnya sebanding dengan arus jangkar ( $\phi$  sebanding  $I_a$ ) maka persamaannya:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b_2}}{E_{b_1}} \times \frac{I_{a_1}}{I_{a_2}} \quad (31)$$

### c. Regulasi kecepatan motor arus searah

Tingkat kecepatan ataupun perubahan kecepatan pada waktu *tidak berbeban* dan pada waktu berbeban penuh akan menghasilkan regulasi kecepatan motor yang mengikuti persamaan:

$$\text{Regulasi kecepatan} = \frac{N_{NL} - N_{FL}}{N_{FL}} \times 100\% \quad (32)$$

dimana:

$N_{NL}$  = Kecepatan pada waktu beban nol.

$N_{FL}$  = Kecepatan pada waktu beban penuh.

### Contoh Soal 6.

Motor arus searah shunt 250 volt bekerja dengan kecepatan 1000 rpm, pada waktu beban nol menarik arus dari jala-jala 8 Ampere, resistansi jangkar dan resistansi medan shunt masing-masing sebesar 0,2 ohm dan 250 ohm. Hitung kecepatan jika dibebani sampai arus jala-jala 50 Ampere. Andaikan rugi tegangan pada sikat dapat diabaikan dan fluksnya tetap.

#### Penyelesaian:

Berdasarkan persamaan (32), diperoleh,

$$\frac{N}{N_o} = \frac{E_o}{E_{b_o}} \times \frac{\phi_o}{\phi} \quad \text{karena } \phi_o = \phi \quad \text{maka} \quad \frac{N}{N_o} = \frac{E_o}{E_{b_o}}$$

$$I_{sh} = \frac{250}{250} = 1 \text{ Ampere} \rightarrow V_t = I_{sh} R_{sh}$$

**Waktu beban nol**, maka arus jangkar:

$$I_{a_o} = 8 - 1 = 7 \text{ Ampere}$$

**Waktu dibebani**, maka arus jangkar:

$$I_a = 50 - 1 = 49 \text{ Ampere}$$

**EMF (GGL) lawan waktu beban nol**,

$$E_{b_o} = V_t - I_{a_o} R_a - \Delta v_{si}$$

$$E_{b_o} = 250 - (7 \times 0,2) - 0 = 248,6 \text{ volt}$$

**EMF (GGL) lawan waktu dibebani:**

$$E_b = V_t - I_a R_a - \Delta v_{si}$$

$$E_b = 250 - (49 \times 0,2) - 0 = 240,2 \text{ volt}$$

$$\frac{N}{1000} = \frac{240,2}{248,6} \rightarrow N = 966,2 \text{ rpm}$$

**Contoh Soal 7.**

Motor arus searah seri bekerja pada kecepatan 800 rpm dengan arus jala-jala 100 Ampere dan tegangan terminal 230 volt. Resistansi jangkar dan resistansi medan seri masing-masing 0,15 ohm dan 0,1 ohm, rugi tegangan pada sikat diabaikan. Hitung kecepatan jika motor bekerja dengan arus jala-jala 25 Ampere dan fluksnya 45% dari fluks pada waktu arus jala-jala 100 A.

**Penyelesaian:**

$$N_1 = 800 \text{ rpm}; E_b = V_t - I_a R_a - I R_s - \Delta v_{si}$$

$$I_a = I \rightarrow E_{b_1} = 230 - 100 (0,15 + 0,1) - 0 = 205 \text{ volt}$$

$$E_{b_2} = 230 - 25 (0,15 + 0,1) = 223,75 \text{ volt}$$

$$\phi_2 = 0,45 \phi_1 \rightarrow \frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{1}{0,45}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b_2}}{E_{b_1}} \times \frac{\phi_1}{\phi_2}$$

$$\frac{N_2}{800} = \frac{223,75}{205} \times \frac{1}{0,45}$$

$$N_2 = 1940 \text{ rpm}$$

**Contoh Soal 8.**

Motor arus searah shunt 230 volt mempunyai resistansi jangkar 0,5 ohm dan resistansi medan shunt 115 ohm.

Pada waktu beban nol kecepatannya 1200 rpm dan arus jangkar 2,5 Ampere. Pada waktu beban penuh kecepatannya turun menjadi 1120 rpm.

**Hitung:**

- Arus jala-jala pada waktu beban penuh.
- Daya input pada waktu beban penuh.
- Regulasi kecepatannya.

**Penyelesaian:**

$$\begin{aligned} \text{a. } N_{NL} &= 1200 \text{ rpm} ; N_{FL} = 1120 \text{ rpm} \\ E_{b_o} &= V_t - I_a R_a - \Delta v_{si} = 230 - (2,5 \times 0,5) = 228,75 \text{ volt} \\ E_b &= 230 - (I_a \times 0,5) \end{aligned}$$

$$\frac{N_{FL}}{N_{NL}} = \frac{E_b}{E_{b_o}} \rightarrow \frac{1120}{1200} = \frac{230 - (I_a \times 0,5)}{228,75}$$

$$I_a = 33 \text{ Ampere}$$

$$I_{sh} = \frac{230}{115} = 2 \text{ Ampere} ; I = 33 + 2 = 35 \text{ Ampere}$$

Arus jala-jala pada waktu beban penuh = 35 Ampere.

- Daya input waktu beban penuh =  $230 \times 35 = 8,05 \text{ kW}$ .
- 

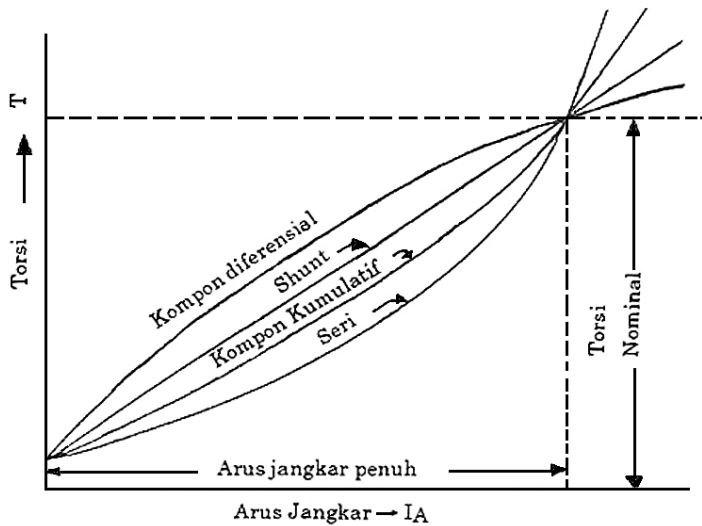
$$\begin{aligned} \text{d. Regulasi} &= \frac{N_{NL} - N_{FL}}{N_{FL}} \times 100\% \\ &= \frac{1200 - 1120}{1120} \times 100\% = 7,14\% \end{aligned}$$

**11.5 Karakteristik Motor Arus Searah**

Karakteristik yang penting untuk motor arus searah ada dua macam, sebagai berikut:

**1. Karakteristik Torsi terhadap Arus jangkar ( $T$  vs  $I_a$ )**

Dari persamaan umum torsi  $T = K\phi I_a \text{ lb-ft}$  (20), yang berlaku untuk semua motor, maka untuk masing-masing kurva karakteristiknya dapat ditentukan seperti Gambar 11.6 berikut.



Gambar 11. 6. Kurva karakteristik torsi terhadap arus jangkar untuk motor ( $T$  vs  $I_a$ ) dari berbagai motor arus searah.

Keterangan Gambar 11.6 :

**a. Motor arus searah shunt.**

**Kurva karakteristik torsi terhadap arus jangkar** untuk motor arus searah shunt, berdasarkan persamaan (20) hanya tergantung pada arus jangkarnya sebab fluksnya tetap ( $T = k_1 \cdot I_a$ ) sehingga kurvanya merupakan garis lurus.

**b. Motor arus searah seri.**

**Kurva karakteristik torsi terhadap arus jangkar untuk motor arus searah seri** berdasarkan persamaan (20) tergantung baik pada fluks maupun pada arus jangkar.

Fluksnya tergantung pada arus jangkar ( $\phi = k_2 \cdot I_a$ ) sehingga persamaan (20) menjadi:  $T = k \cdot k_2 \cdot I_a \cdot I_a = k \cdot k_2 \cdot I_a^2$ , atau  $T = k_3 I_a^2$  sehingga kurvanya merupakan parabola.

**c. Motor arus searah kompon.**

**Kurva karakteristik torsi terhadap arus jangkar untuk motor arus searah kompon** berdasarkan persamaan (20) tergantung baik pada fluks maupun arus jangkar. Fluksnya tergantung pada fluks dari medan shunt dan fluks dari medan seri. Fluks dari medan seri timbul bila motor

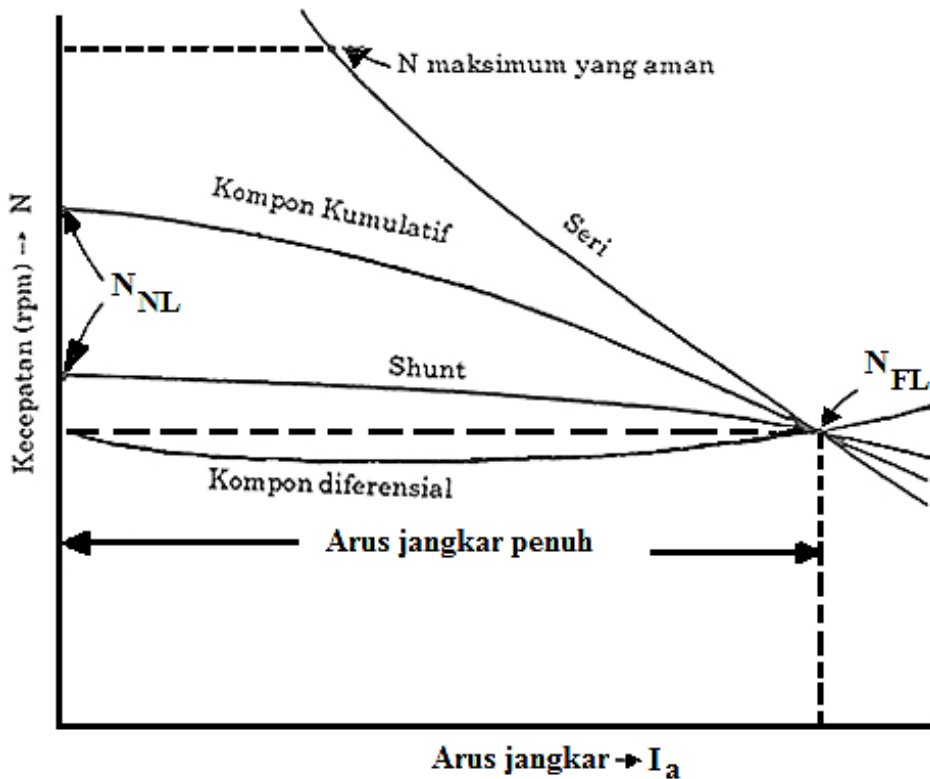
dibebani, dan akan menambah fluks dari medan shunt untuk motor arus searah kompon kumulatif, fluks tersebut akan *melawan (mengurangi) fluks dari medan shunt untuk motor arus searah kompon diferensial*, sehingga kurva karakteristik torsi terhadap arus jangkar untuk motor arus searah kompon, ada 2 kurva yaitu:

- i. **Kurva karakteristik torsi terhadap arus jangkar untuk motor arus searah kompon kumulatif berada diantara motor shunt dan motor seri.**
- ii. **Kurva karakteristik torsi terhadap arus jangkar untuk motor arus searah kompon diferensial berada di atas dari motor shunt.**

## **2. Karakteristik kecepatan terhadap arus jangkar ( $N$ vs $I_a$ )**

Persamaan untuk kecepatan motor atau persamaan (28),  $E_b$  tergantung dari rangkaian ekivalen motor, yakni salah satunya tergantung pada arus jangkar ( $I_a$ ), sehingga untuk ketiga motor dapat diterangkan sebagai berikut:

- a. Kecepatan motor arus searah shunt akan naik sekitar 2 sampai 8%, jika beban penuhnya dilepas (lihat Gambar 11.7).
- b. Kecepatan motor arus searah seri akan naik dengan cepat bila beban dilepas, oleh karena itu motor seri selalu digandeng dengan bebannya bila dioperasikan (lihat Gambar 11.7).
- c. Kecepatan motor arus searah kompon, ada dua kurva karakteristik yaitu:
  - i. Motor arus searah kompon kumulatif kecepatannya akan naik sekitar 10 sampai 25% bila bebannya dilepas (lihat Gambar 11.7).
  - ii. Motor arus searah kompon diferensial kecepatannya akan turun sebentar tapi akhirnya akan kembali seperti kecepatan semula (lihat Gambar 11.7).



Gambar 11. 7. Kurva karakteristik kecepatan terhadap arus jangkar ( $N$  vs  $I_a$ ) dari berbagai motor arus searah.

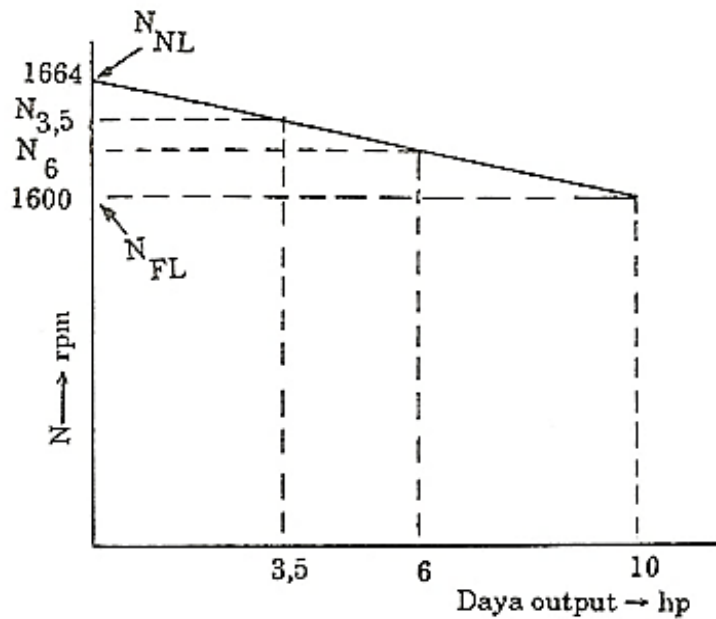
Kurva karakteristik kecepatan terhadap arus jangkar dari motor arus searah, sama dengan kurva karakteristik kecepatan terhadap hp outputnya.

### Contoh Soal 9.

Motor shunt 10 hp pada waktu beban penuh kecepatannya 1600 rpm. Hitung kecepatannya pada waktu beban nol jika regulasi kecepatan 4%.

Andaikan kurva karakteristik kecepatan terhadap hp outputnya, sama dengan kurva kecepatan terhadap arus jangkar, yakni merupakan garis lurus, hitung kecepatannya untuk output 6 hp dan 3,5 hp.

**Penyelesaian:** (lihat Gambar 11.8) berikut,



Gambar 11. 8. Kurva karakteristik kecepatan motor arus searah shunt terhadap hp output yang dianggap linier (garis lurus).

Kecepatan pada waktu beban nol:

$$0,04 = \frac{N_{NL} - 1600}{1600} \rightarrow N_{NL} = 1600 + (0,04 \times 1600) = 1664 \text{ rpm}$$

Kecepatan pada waktu daya output 6 hp:

$$N_{6-hp} = 1600 + \left(\frac{4}{10} \times 64\right) = 1626 \text{ rpm}$$

Kecepatan pada waktu daya output 3,5 hp:

$$N_{3,5} = 1600 + \left(\frac{6,5}{10} \times 64\right) = 1642 \text{ rpm}$$

## 11.6 Pengendalian Kecepatan Motor Arus Searah

Peralatan produksi di pabrik maupun industri yang diputar oleh motor listrik, kadang-kadang memerlukan putaran bervariasi atau lebih dari satu harga putaran.

**Motor arus searah mempunyai daerah pengaturan kecepatan yang luas**, lihat karakteristik kecepatan motor, bila motor arus searah yang diperlukan untuk memutar mesin produksi yang putarannya bervariasi maka kecepatan motor harus dikendalikan.

**Metode pengendalian kecepatan motor arus searah** secara garis besarnya ada dua macam:

- a. Metode konvensional.
- b. Metode dengan rangkaian elektronis.

**Cara pengendalian kecepatan motor arus searah dengan metode konvensional ada 3 macam**, sebagai berikut:

### 1. Pengendalian dengan resistansi medan.

Metode ini dengan menambahkan resistansi yang dapat diatur besarnya pada untai medan untuk motor arus searah shunt dan kompon. Menambah atau menyisipkan resistansi pada untai medan akan mengubah besarnya arus ke kumparan kutubnya sehingga fluks yang dihasilkan bervariasi, berdasarkan persamaan (28) maka kecepatan motor juga akan bervariasi sebagai berikut:

#### a. Motor arus searah shunt:

$$N = \frac{V_t - I_a R_a - \Delta v_{si}}{k \phi_{variabel}} \quad (33)$$

#### b. Motor arus searah kompon:

$$N = \frac{V_t - I_a R_a - I R_s - \Delta v_{si}}{k \phi_{variabel}} \quad (34)$$

### Contoh Soal 10.

Motor arus searah shunt mempunyai resistansi jangkar 0,1 ohm dan resistansi medan shunt 400 ohm. Motor bekerja pada kecepatan 900 rpm, melayani beban dengan tegangan terminal 240 volt dan menarik arus jangkar 50 Ampere. Bila diinginkan kecepatan motor naik menjadi 1000 rpm dengan mengatur kekuatan medan, hitung resistansi yang harus disisipkan pada untai medan dengan asumsi arus jangkar tetap, hubungan antara fluks dan arus medan linier.

### Penyelesaian:

Pada waktu kecepatan 900 rpm.

$$N = \frac{V_t - I_a R_a - \Delta v_{si}}{k \phi_1}$$

$$900 = \frac{240 - 50 \times 0,1 - 0}{k \phi_1} \rightarrow k \phi_1 = \frac{235}{900}$$

$$I_{sh} = \frac{240}{400} = 0,6 \text{ Ampere}$$

Pada waktu kecepatan 1000 rpm.

$$1000 = \frac{240 - 50 \times 0,1 - 0}{k \phi_2} \rightarrow k \phi_2 = \frac{235}{1000}$$

$$I_{sh} = \frac{240}{400 + R_v}$$

$$\frac{k \phi_2}{k \phi_1} = \frac{225/1000}{225/900} \rightarrow \phi = 0,9 \phi_1$$

Hubungan fluks dan arus medan linier.

$$\phi_2 : \phi_1 = I_{sh_2} : I_{sh_1}$$

$$\frac{\phi_2}{\phi_1} = \frac{I_{sh_2}}{I_{sh_1}} \rightarrow 0,9 = \frac{240/(400 + R_v)}{0,6}$$

$$R_v = 44,4 \text{ ohm}$$

Resistansi yang harus disisipkan pada untai medan sebesar 44,4 ohm.

## 2. Pengendalian dengan resistansi jangkar.

Metode ini dengan menambah atau menyisipkan resistansi yang dapat diatur (rheostat) pada untai jangkar, sehingga kecepatannya dapat berubah. Dari persamaan (28),  $E_b$  tergantung dari rangkaian motor, sehingga untuk motor shunt lihat persamaan (5), dimana:

$$E_b = V_t - I_a R_a - \text{rugi tegangan pada sikat}$$

Karena  $R_a$  ditambah dengan resistansi yang dapat diatur ( $R_{var}$ ) maka persamaan  $E_b$  menjadi,

$$E_b = V_t - I_a (R_a + R_{var}) - \Delta v_{si}$$

dan kecepatannya juga akan mengikuti persamaan:

$$N = \frac{V_t - I_a (R_a + R_{var}) - \Delta v_{si}}{k \cdot \phi} \quad (35)$$

### Contoh Soal 11.

Motor arus searah shunt dengan kecepatan 1200 rpm, tegangan terminal 420 volt menarik arus jangkar 30 Ampere. Hitung resistansi yang disisipkan (ditambahkan) pada rangkaian jangkar sehingga kecepatannya turun menjadi 600 rpm dengan arus jangkar tetap. Andaikan resistansi jangkar sebesar 3 ohm.

#### Penyelesaian:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b_2}/k\phi}{E_{b_1}/k\phi} = \frac{E_{b_2}}{E_{b_1}}$$

$$N_1 = 1200 \text{ rpm} ; E_{b_1} = 420 - (30 \times 3) - 0 = 330 \text{ volt}$$

$$N_2 = 600 \text{ rpm} ; E_{b_2} = 420 - 30 (3 + R_v) - 0 = 330 - 30 R_v$$

$$\frac{600}{1200} = \frac{330 - 30 R_v}{330} \rightarrow 0,5 = 1 - \frac{3}{33} R_v$$

$$R_v = 5,5 \text{ ohm}$$

Resistansi yang harus ditambahkan pada untai jangkar sebesar 5,5 ohm.

### 3. Pengendalian tegangan masuk jangkar

Metode ini dengan bervariasi tegangan masuk ke untai jangkar sehingga kecepatan berubah. Dari persamaan (28), kecepatan  $N = E_b/k\phi$  ;  $E_b$  tergantung dari rangkaian motor, sehingga untuk motor shunt, lihat di persamaan (5), yakni:

$$E_b = V_t - I_a R_a - \Delta v_{si}$$

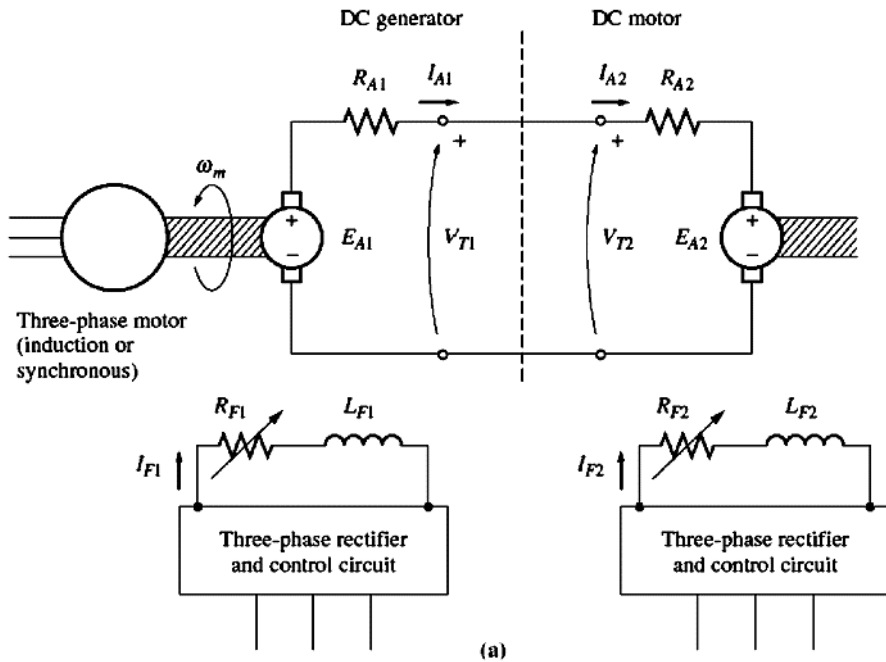
Ketika tegangan masuk di-variasi ( $V_{tvar}$ ) maka:

$$E_b = V_{tvar} - I_a R_a - \Delta v_{si}$$

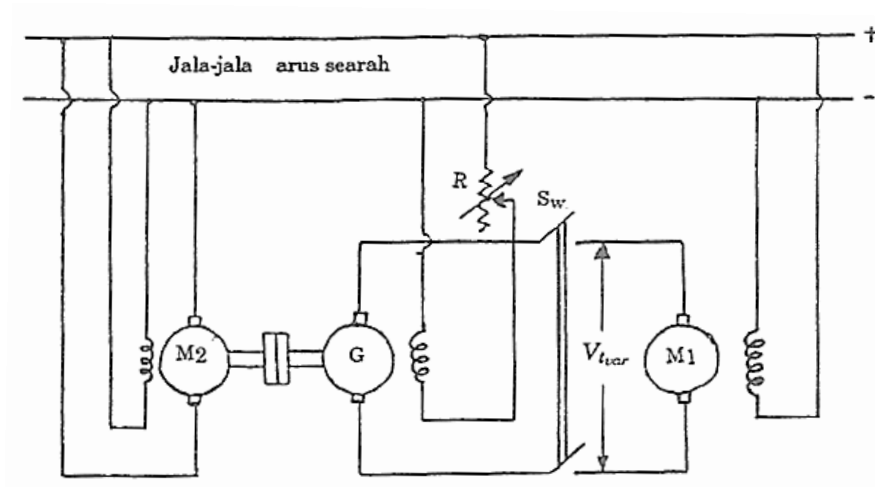
sehingga **kecepatan** akan mengikuti persamaan:

$$N = \frac{V_{tvar} - I_a R_a - \Delta v_{si}}{k\phi} \quad (36)$$

Metode ini lebih dikenal dengan pengendalian kecepatan dengan sistem Ward Leonard yang rangkaianannya seperti Gambar 11.9 berikut ini.



Gambar 11. 9. Hubungan motor sistem Ward Leonard.



Gambar 11. 10. Rangkaian ekivalen sistem Ward Leonard.

Keterangan Gambar 11.10:

### 1. $M_2 - G$ set

- a.  $M_2$  sebagai motor penggerak generator (G), dapat berupa motor arus searah shunt, tegangan masuk jangkar dan tegangan masuk medan dilayani dari jala-jala arus searah.
- b. Generator (G) dikopel (diputar) oleh motor  $M_2$ , generator ini merupakan generator arus searah dengan penguatan bebas, tegangan untuk medan atau penguatan dilayani dari jala-jala yang sama dengan motor  $M_2$ . Tegangan ke medan tersebut dapat divariasikan dengan mengubah resistansi R sehingga tegangan terminal dari generator dapat berubah-ubah besarnya, tegangan yang bervariasi ini yang diberikan ke untai jangkar motor arus searah yang dikendalikan kecepatannya.

### 2. $M_1$

Motor  $M_1$  adalah motor arus searah yang dikendalikan kecepatannya. Tegangan masuk ke untai jangkar dilayani dari generator G yang bervariasi tegangan terminalnya. Untuk medan dari motor ini penguatannya dilayani dari jala-jala yang melayani  $M_2 - G$  set.

## 11.7 Efisiensi Mesin Arus Searah

Secara umum efisiensi atau rendemen atau daya guna dari mesin dapat mengikuti persamaan berikut:

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{Daya keluaran (output)}}{\text{Daya masukan (input)}} \times 100\% \quad (37)$$

Daya masukan untuk generator berupa daya mekanik dan daya keluarannya berupa daya listrik, sebaliknya untuk motor, daya masukannya berupa daya listrik dan daya keluarannya berupa daya mekanik, sehingga harus ada *konversi daya mekanik yang berupa daya kuda (hp)* dengan daya listrik yang berupa *Watt* sebagai berikut:

$$1 \text{ hp} = 33.000 \text{ lb-ft} = 746 \text{ watt}$$

Berdasarkan rumus umum tersebut diatas maka untuk:

### 1. Efisiensi generator arus searah.

Persamaannya dapat dituliskan:

$$Efisiensi = \frac{\text{Daya keluaran (output) dalam watt}}{\text{Daya masukan (input) dalam watt}} \times 100\% \quad (38)$$

Karena, **daya masukan dalam watt (watt masukan) = daya keluaran dalam watt (watt keluaran) ditambah dengan rugi-rugi daya dalam watt (watt rugi-rugi)** maka efisiensi untuk generator dapat dituliskan:

$$Efisiensi = \frac{\text{watt keluaran}}{\text{watt keluaran} + \text{rugi} - \text{rugi}} \times 100\% \quad (39)$$

atau,

$$Efisiensi = \frac{\text{watt masukan} - \text{watt rugi} - \text{rugi}}{\text{watt masukan}} \times 100\%$$

atau,

$$Efisiensi = \left[ 1 - \frac{\text{watt rugi} - \text{rugi}}{\text{watt masukan}} \right] \times 100\% \quad (40)$$

**Rugi-rugi daya pada mesin arus searah** dapat berupa:

- a. **Rugi-rugi daya karena rotasi**, terdiri dari rugi gesek bantalan, rugi gesek sikat dan rugi angin.
- b. **Rugi-rugi daya karena inti (rugi inti)** berupa rugi histeresis dan rugi arus pusar (eddy current).
- c. **Rugi-rugi daya karena tembaga (rugi tembaga)** terjadi pada kumparan medan shunt, seri, kumparan kutub bantu (interpole) dan kumparan kompensasi.
- d. **Rugi-rugi daya sasar atau rugi beban sasar (*stray load loss*)** karena faktor-faktor distorsi fluks dan tidak seragam arus pada kumparan jangkar serta arus hubung singkat pada kumparan.

### 11.8 Efisiensi motor arus searah

Berdasarkan persamaan (37) maka untuk motor, efisiensinya dapat juga mengikuti persamaan berikut:

$$Efisiensi = \frac{\text{Daya keluaran dalam hp} \times 746}{\text{watt masukan}} \times 100\% \quad (41)$$

Berhubung karena:

$$\text{watt masukan} = (\text{hp keluaran} \times 746) + \text{watt rugi-rugi}$$

maka,

$$Efisiensi = \frac{\text{hp keluaran} \times 746}{(\text{hp keluaran} \times 746) + \text{watt rugi - rugi}} \times 100\% \quad (42)$$

atau,

$$Efisiensi = \frac{\text{watt masukan} - (\text{watt rugi} - \text{rugi})}{\text{watt masukan}} \times 100\%$$

atau,

$$Efisiensi = \left[ 1 - \frac{\text{watt rugi} - \text{rugi}}{\text{watt masukan}} \right] \times 100\% \quad (43)$$

### Contoh Soal 12.

Generator arus searah kompon rata 10 kW, 250 volt, rangkaian ekivalennya berupa kompon panjang mempunyai resistansi medan shunt sebesar 125 ohm, resistansi rangkaian jangkar 0,4 ohm, resistansi medan seri 0,05 ohm, rugi-rugi beban sasar 540 watt, rugi tegangan pada sikat waktu beban penuh sebesar 2 volt, hitung efisiensinya.

#### Penyelesaian:

$$\text{Arus beban penuh } (I_{FL}) = \frac{10.000}{250} = 40 \text{ Ampere}$$

$$\text{Arus pada medan shunt} = \frac{250}{125} = 2 \text{ Ampere}$$

$$\text{Arus jangkar} = 40 + 2 = 42 \text{ Ampere.}$$

#### Rugi-rugi daya:

$$\text{Daya sasar} = 540 \text{ watt}$$

$$\text{Jangkar } (42)^2 \times 0,4 = 705 \text{ watt}$$

$$\text{Medan seri } (42)^2 \times 0,05 = 88 \text{ watt}$$

$$\text{Medan shunt } 250 \times 2 = 500 \text{ watt}$$

$$\text{Kontak sikat } 2 \times 42 = 82 \text{ watt}$$

---


$$\text{Rugi-rugi daya total} = 1.917 \text{ watt}$$

$$Efisiensi = \left[ 1 - \frac{1.917}{10.000 + 1.917} \right] \times 100\% = 83,9\%$$

### Contoh Soal 13.

Motor arus searah 15 hp mempunyai rugi-rugi total sebesar 1.310 watt waktu bekerja dengan beban penuh. Hitung efisiensinya.

#### Penyelesaian:

$$Efisiensi = \left[ 1 - \frac{\text{watt rugi} - \text{rugi}}{\text{watt masukan}} \right] \times 100\%$$

$$Efisiensi = \left[ 1 - \frac{\text{watt rugi} - \text{rugi}}{\text{watt keluaran} + \text{watt rugi} - \text{rugi}} \right] \times 100\%$$

$$Efisiensi = \left[ 1 - \frac{1310}{(15 \times 746) + 1310} \right] \times 100\%$$

$$Efisiensi = 89,5 \%$$

## 11.9 Soal Latihan

### Soal Teori:

1. Jelaskan persamaan umum untuk kecepatan motor arus searah? Apa yang dimaksud dengan regulasi kecepatan.
2. Jelaskan karakteristik torsi terhadap arus jangkar pada motor arus searah.
3. Jelaskan karakteristik kecepatan terhadap arus jangkar dari motor arus searah.
4. Jelaskan cara-cara pengendalian kecepatan motor arus searah.
5. Jelaskan cara pengendalian kecepatan motor arus searah dengan sistem Ward Leonard.
6. Jelaskan rugi-rugi daya dan efisiensi dari mesin arus searah.

### Soal Perhitungan:

1. Suatu mesin arus searah shunt 25 kW, 250 volt mempunyai resistansi jangkar 0,06 ohm dan resistansi medan shunt 100 ohm. Hitung daya yang dibangkitkan oleh jangkar bila bekerja:
  - a. Sebagai generator melayani beban 25 kW.
  - b. Sebagai motor dengan input 25 kW.
  
2. Suatu motor arus searah shunt 115 volt, mempunyai resistansi jangkar 0,22 ohm, rugi tegangan total pada sikat 2 volt, hitunglah arus jangkar bila:
  - a. EMF lawan sebesar 108 volt.
  - b. EMF lawan turun 2 volt, waktu beban dinaikkan.
  
3. Suatu motor arus searah kompon bekerja dengan kecepatan 1520 rpm bila tegangan terminal 230 volt. Jika fluks per kutub 620.000 maxwell dan resistansi jangkar 0,43 ohm, hitunglah jika diasumsikan harga  $k = 2,2 \times 10^7$  dan rugi tegangan pada sikat 2 volt:
  - a. EMF lawan.
  - b. Arus jangkar.
  
4. Suatu motor arus searah shunt mempunyai resistansi jangkar 0,2 ohm, resistansi medan shunt sebesar 60 ohm, rugi tegangan pada sikat 3 volt, tegangan terminal 120 volt. Pada waktu melayani beban penuh kecepatannya 1800 rpm, menarik arus jala-jala 40 Ampere. Hitunglah:
  - a. Kecepatan pada 50% beban penuh.
  - b. Kecepatan pada 125% beban penuh.

# **BAB 12**

## **GENERATOR ARUS SEARAH (DC)**

### **12.1 Pendahuluan**

Sebagaimana telah dibahas diawal bahwa mesin listrik dapat berupa generator dan motor, sehingga mesin arus searah juga terbagi atas :

1. Motor arus searah.
2. Generator arus searah.

Generator arus searah berfungsi mengubah energi mekanis dari penggerak mulanya menjadi energi listrik yang diberikan ke beban, sedang motor arus searah berfungsi mengubah energi listrik yang diterima menjadi energi mekanis berupa kecepatan putar poros yang nantinya digunakan untuk memutar peralatan-peralatan produksi di pabrik maupun industri.

Satu perangkat mesin arus searah dapat berfungsi sebagai generator, dan pada saat yang lain dapat berfungsi sebagai motor, sehingga konstruksinya sama, dalam hal ini maka konstruksi yang akan dibahas adalah konstruksi mesin arus searah.

### **12.2 Konstruksi Mesin Arus Searah**

Konstruksi dari mesin arus searah terbagi atas:

1. **Stator** adalah bagian mesin arus searah yang diam.
2. **Rotor** atau **jangkar** atau **angker** atau **armature** adalah bagian dari mesin yang berputar.
3. **Celah udara** adalah ruangan yang ada antara stator dan jangkar.

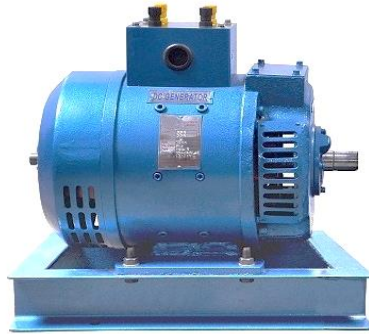
**Stator** terdiri dari dari:

- i. **Gandar (rumah)**, terbuat dari besi tuang.
- ii. **Kutub** terdiri dari :
  - a. Inti dari besi lunak atau baja silikon.
  - b. Sepatu kutub materialnya sama dengan inti.
  - c. Lilitan dari tembaga.

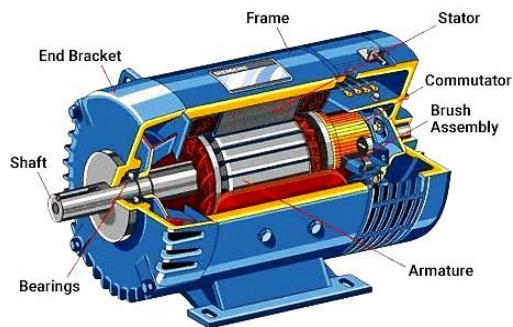
**Rotor** atau **armatur (jangkar = angker)** terdiri atas:

- i. **Inti**, materialnya sama dengan inti kutub.

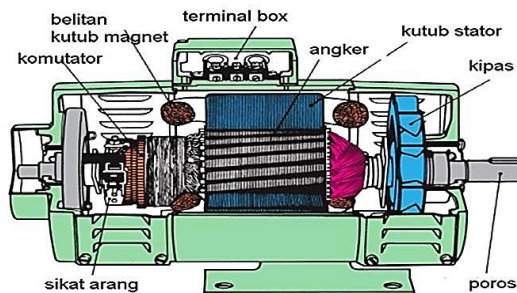
- ii. **Belitan (penghantar)**, dari tembaga.
- iii. **Komutator**, dari tembaga.
- iv. **Sikat**, dari karbon.



Gambar 12. 1. Generator arus searah.



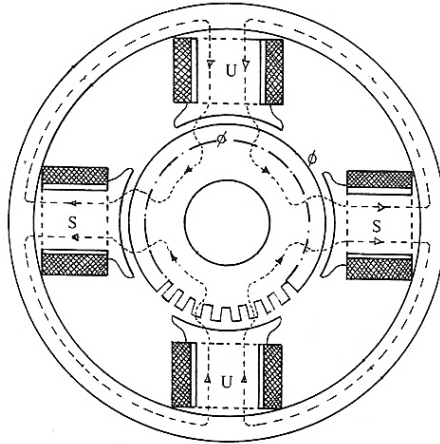
Gambar 12. 2. Komponen-komponen generator arus searah.



Gambar 12. 3. Tampilan irisan dari generator arus searah.

### 12.3 Bagian-Bagian Penting Generator Arus Searah

Pada mesin listrik ada bagian yang diam (stator) dan ada bagian yang berputar (rotor). Untuk generator arus searah yang termasuk stator adalah badan (*body*), magnet, sikat-sikat. Sedangkan rotor-nya jangkar dan lilitannya.



Gambar 12. 4. Badan (*body*) generator arus searah. Perhatikan jalannya garis-garis gaya magnet.

#### 12.3.1 Badan generator

Fungsi utama dari badan generator adalah sebagai bagian dari tempat mengalirnya fluks magnet yang dihasilkan kutub-kutub magnet, karena itu badan generator dibuat dari bahan ferromagnetik. Disamping itu badan generator ini berfungsi untuk meletakkan alat-alat tertentu dan melindungi bagian-bagian mesin lainnya. Oleh karena itu badan generator harus dibuat dari bahan yang kuat. Untuk memenuhi kedua persyaratan pokok di atas, maka umumnya badan generator untuk mesin-mesin kecil dibuat dari besi tuang. Sedangkan generator yang besar umumnya dibuat dari plat-plat campuran baja. Biasanya pada generator terdapat “*papan nama*” (name plate) yang bertuliskan spesifikasi umum atau data-data teknik dari generator. Dengan adanya papan nama tersebut, dapatlah diketahui beberapa hal pokok yang perlu diketahui dari generator tersebut. Selain name plate, pada badan generator juga terdapat “Kotak ujung” (terminal box) yang merupakan tempat-tempat ujung-ujung lilitan penguat magnet dan lilitan jangkar.

### 12.3.2 Inti kutub magnet dan lilitan penguat magnet

**Fluks magnet** yang terdapat pada generator arus searah **dihasilkan oleh kutub-kutub magnet buatan** yang dibuat dengan prinsip elektromagnetik. Adapun aliran fluks magnet dari kutub utara melalui celah udara, terus mengalir ke jangkar, ke kutub selatan (setelah lebih dahulu melalui celah udara), kemudian kembali ke kutub utara melewati badan generator.

#### 1. Sikat-sikat

**Fungsi sikat-sikat** adalah untuk jembatan bagi aliran arus dari lilitan jangkar dengan beban. Disamping itu sikat-sikat memegang peranan penting untuk terjadinya komutasi. Agar gesekan antara komutator-komutator dan sikat tidak mengakibatkan ausnya komutator, maka sikat harus lebih lunak daripada komutator. Biasanya sikat dibuat dari bahan arang (*coal*).

#### 2. Komutator

**Komutator berfungsi sebagai penyearah mekanik**, yang bersama-sama dengan sikat-sikat membuat suatu kerjasama yang disebut **komutasi**. Supaya menghasilkan penyearahan yang lebih baik (lebih rata) maka komutator yang digunakan hendaknya dalam jumlah yang besar. Dalam hal ini setiap belahan (segmen) komutator tidak lagi merupakan bentuk setengah cincin, tetapi telah berbentuk lempeng-lempeng. Diantara setiap lempeng (segmen komutator) terdapat bahan isolator.

Komutator terdiri dari:

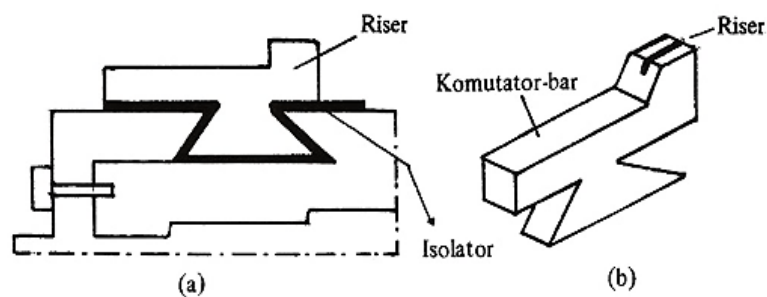
- a. **Komutator bar**, merupakan tempat terjadinya pergesekan antara komutator dengan sikat-skat.
- b. **Riser**, merupakan bagian yang menjadi tempat hubungan komutator dengan ujung dari juluran lilitan jangkar.

Selain sebagai penyearah mekanik, **komutator juga berfungsi untuk mengumpulkan ggl induksi yang terbentuk pada sisi-sisi kumparan**. Oleh karena itu komutator dibuat dari bahan konduktor, dalam hal ini digunakan dari campuran tembaga.

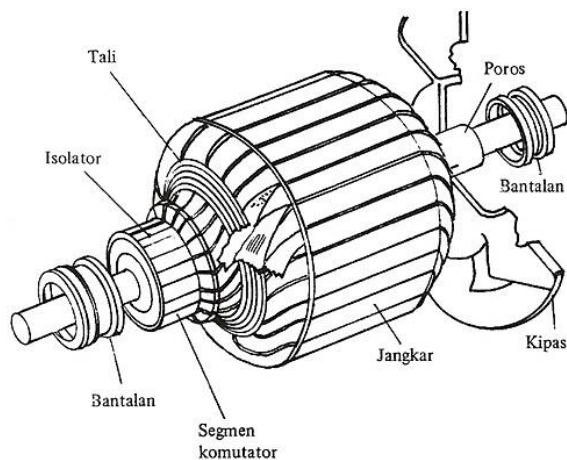
Isolator yang digunakan yang terletak antara komutator-komutator dan antara komutator dengan poros (as), menentukan kelas dari generator berdasarkan kemampuan terhadap suhu yang timbul dalam

mesin tersebut. Jadi disamping sebagai isolator terhadap listrik, maka isolator yang digunakan harus mampu terhadap panas tertentu. Berdasarkan jenis isolator yang digunakan, dari kemampuan panas ini dikenal kelas-kelas sebagai berikut:

- a. **Kelas A** : katun, sutera alam, sutera buatan, kertas.
- b. **Kelas B** : serat asbes, serat gelas.
- c. **Kelas C** : mika, gelas, kuarsa, porselin, keramik.



Gambar 12. 5. a). Pemasangan komutator. b). segmen komutator.



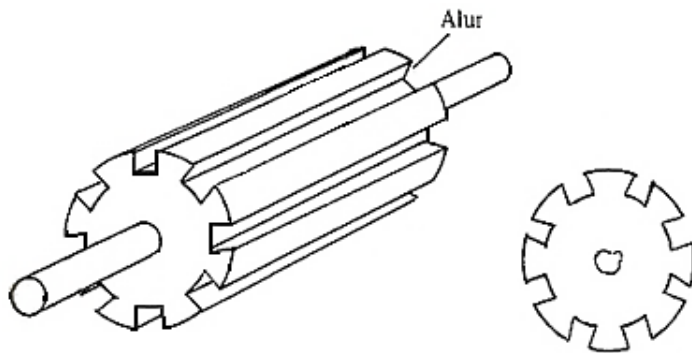
Gambar 12. 6. Jangkar dan lilitannya.

### 12.3.3 Jangkar

Jangkar yang umum digunakan dalam generator arus searah adalah yang **berbentuk silinder** yang diberi alur-alur pada permukaannya untuk tempat melilitkan kumparan-kumparan tempat terbentuknya ggl induksi.

Jangkar dibuat dari bahan ferromagnetik, dengan maksud agar kumparan-kumparan (lilitan jangkar) terletak dalam daerah yang induksi magnetnya besar, supaya ggl induksi yang terbentuk dapat bertambah besar.

Seperti halnya inti kutub magnet, maka jangkar dibuat dari bahan berlapis-lapis untuk mengurangi panas yang terbentuk karena adanya arus liar. Bahan yang digunakan untuk jangkar ini sejenis campuran baja silikon.



Gambar 12. 7. a). Jangkar beralur. b). Lempeng plat jangkar.

#### 12.3.4 Lilitan jangkar

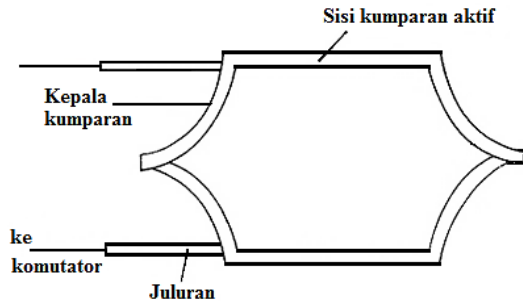
Telah dijelaskan bahwa lilitan jangkar pada generator arus searah berfungsi sebagai tempat terbentuknya ggl induksi.

Pada prinsipnya kumparan terdiri dari:

- a. **Sisi kumparan aktif**, yaitu bagian sisi kumparan yang terdapat dalam alur jangkar yang merupakan bagian ujung yang aktif (terjadinya ggl induksi saat generator bekerja). Setiap sisi kumparan biasanya terdiri dari beberapa buah kawat.
- b. **Kepala kumparan**, yaitu bagian dari kumparan yang terletak di luar alur yang berfungsi sebagai penghubung satu sisi kumparan aktif dengan sisi kumparan aktif lain dari kumparan tersebut.
- c. **Juluran**, yaitu bagian ujung kumparan yang menghubungkan sisi aktif dengan komutator.

Perhatikan Gambar 12.8, sisi kumparan pada prinsipnya berhubungan dengan sebuah komutator pada bagian risernya.

Bahan yang digunakan sebagai kumparan adalah kawat email yaitu kawat yang berisolasi sejenis zat kimia.

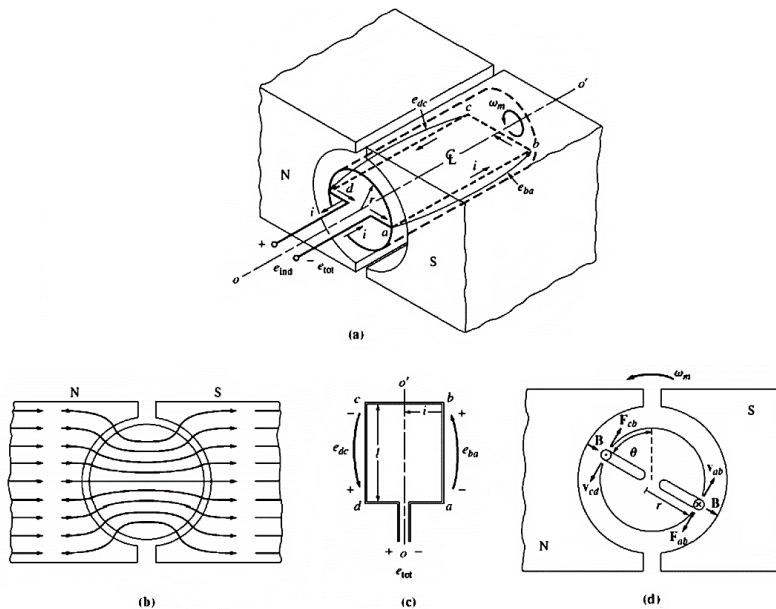


Gambar 12. 8. Kumparan jangkar.

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, maka pada lilitan jangkar akan terbentuk ggl induksi. Hal ini disebabkan lilitan jangkar tersebut nantinya akan berputar dalam medan magnet apabila generator bekerja.

### 12.4 Prinsip Kerja Generator Arus Searah

Prinsip kerja dari generator arus searah, didasarkan kepada hukum Lenz dan prinsip kerja dari motor arus searah, didasarkan kepada hukum Ampere.



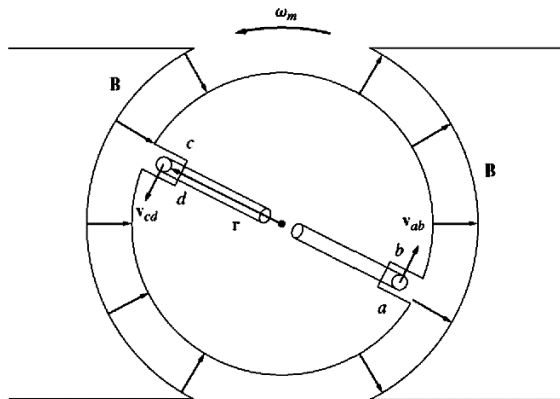
Gambar 12. 9. Loop kawat sederhana yang berputar diantara permukaan kutub. (a) tampilan perspektif; (b) terlihat garis-garis gaya dari kutub  $\mathbf{U}$  menuju kutub  $\mathbf{S}$ ; (c) tampilan bagian atas dari loop kawat penghantar; dan (d) tampilan depan.

## 12.5 Tegangan Induksi pada Loop yang Berputar

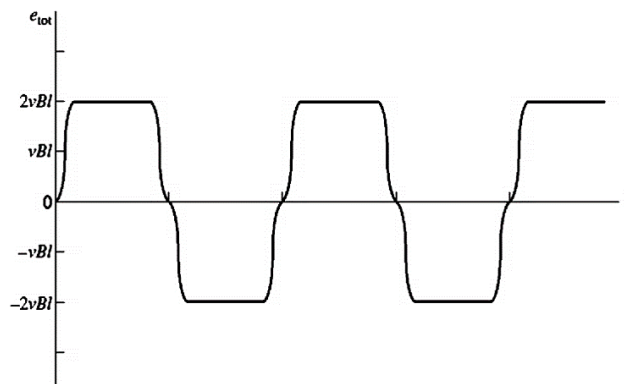
Jika rotor mesin diputar, maka timbul tegangan induksi pada loop lilitan kawat. Untuk menentukan besar dan bentuk dari tegangan, lihat Gambar 12.10. Loop kawat berbentuk persegi panjang, dengan sisi **ab** dan **cd** tegak lurus bidang halaman ini dan sisi **bc** dan **da** sejajar bidang halaman ini. Medan magnetik **konstan** dan **tegak lurus** permukaan rotor dalam area dibawah permukaan kutub dan besar medan magnetik cepat turun menjadi nol pada ujung dari kutub.

Untuk menentukan tegangan total  $\vec{e}_{tot}$  pada loop, perhatikan setiap segmen loop masing-masing dan jumlahkan semua tegangan yang timbul. Tegangan pada setiap segmen loop ditentukan oleh:

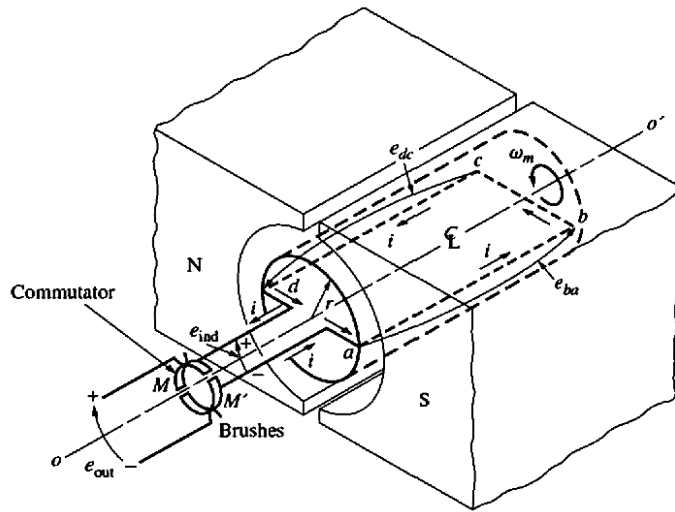
$$\vec{e}_{tot} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \ell \quad (1)$$



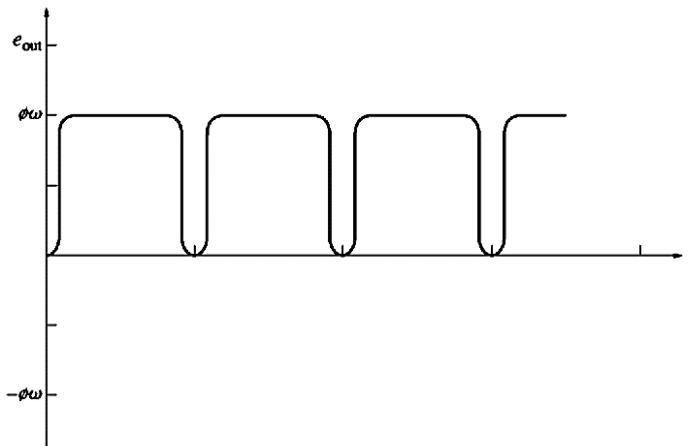
Gambar 12. 10. Cara menentukan persamaan tegangan induksi pada loop.



Gambar 12. 11. Tegangan keluaran pada loop dari Gambar 12.10.



(a)



(b)

Gambar 12. 12. Cara mendapatkan tegangan dc menggunakan komutator dan sikat. (a) tampilans perspektif; (b) tegangan keluaran yang dihasilkan.

### 12.6 Cara Memperoleh Tegangan DC dari Loop yang Berputar

Gambar 12.11 melukiskan tegangan  $\vec{e}_{tot}$  yang dibangkitkan oleh loop kawat konduktor yang berputar. Seperti ditunjukkan dalam Gambar 12.11, tegangan yang muncul pada loop kawat nilainya konstan yang akan bergantian antara nilai positif dan nilai negatif. Bagaimanakah mesin ini dapat menghasilkan tegangan dc bila tegangan induksi pada loop berupa tegangan ac?

Salah satu caranya diperlihatkan dalam Gambar 12.12a. Diperlihatkan pada Gambar 12.12a, ada 2 segmen konduktor setengah lingkaran ditambahkan pada ujung loop kawat penghantar, dan 2 kontak tetap dipasang pada sudut tertentu sedemikian rupa sehingga pada saat tegangan yang muncul pada loop **NOL**, maka kontak-kontak akan menghubungkan-singkatkan kedua segmen tersebut. Dengan cara demikian, *setiap kali tegangan loop berubah arah, kontak juga akan berubah koneksi, dan tegangan keluaran kontak selalu muncul pada loop dengan cara yang sama* pada Gambar 12.12b). **Segmen setengah lingkaran yang berputar** disebut **segmen komutator**, dan **kontak tetap** disebut **sikat**.

### **Torsi yang Diinduksikan dalam Loop yang Berputar**

Misalkan baterai sekarang terhubung ke mesin pada Gambar 12.12. Konfigurasi yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 12.13. Berapa torsi yang akan dihasilkan dalam loop ketika sakelar ditutup dan arus dibiarkan mengalir ke dalamnya? Untuk menentukan torsi ini, lihat keseluruhan loop yang ditunjukkan pada Gambar 12.13b.

Pendekatan yang diambil dalam menentukan torsi pada loop adalah dengan melihat satu segmen loop pada suatu saat dan kemudian menjumlahkan efek dari setiap segmen individu. **Gaya** pada segmen loop diberikan oleh Persamaan (2):

$$\vec{F} = i(\ell \times \vec{B}) \quad (2)$$

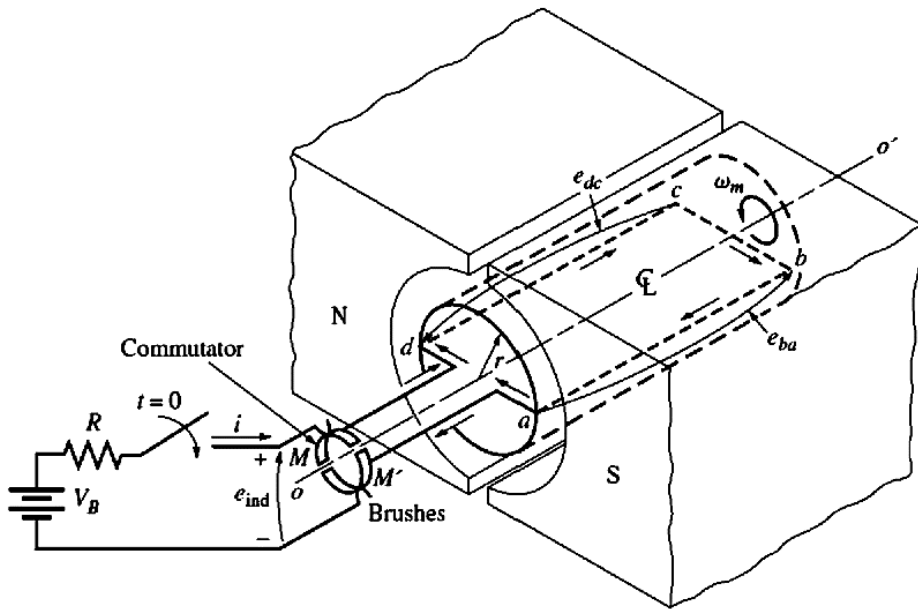
dan **torsi** pada segmen diberikan oleh:

$$\tau = rF \sin \theta \quad (3)$$

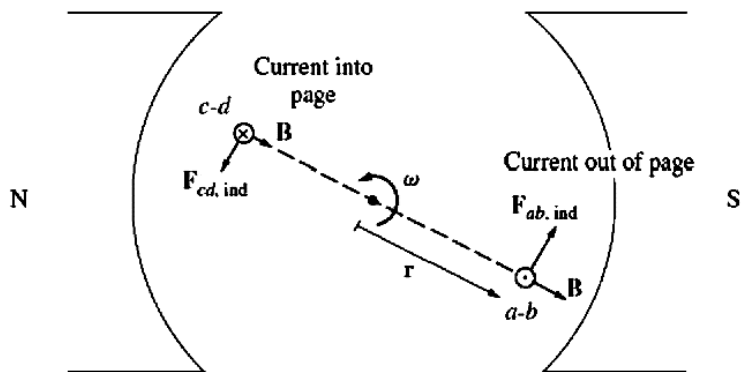
dimana  $\theta$  adalah sudut antara  $\vec{r}$  and  $\vec{F}$ . Torsi pada dasarnya **NOL** setiap kali loop berada di luar ujung/tepi kutub.

Dengan demikian, **torsi yang dihasilkan dalam mesin adalah produk dari fluks dalam mesin dan arus dalam mesin**, dikalikan beberapa kuantitas yang mewakili konstruksi mekanis mesin (persentase rotor yang ditutupi oleh permukaan kutub). Secara umum, torsi di setiap mesin dc real akan bergantung pada tiga faktor yang sama:

1. **Fluks**  $\theta$  dalam mesin
2. **Arus jangkar** (rotor)  $I_A$  dalam mesin
3. **Konstanta** yang bergantung pada konstruksi mesin.



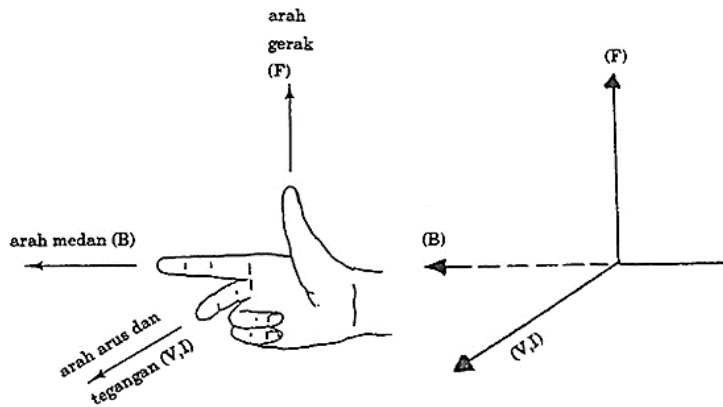
(a)



(b)

Gambar 12. 13. Cara mendapatkan persamaan torsi induksi pada loop konduktor.

Dalam menentukan arah arus dan tegangan (ggl atau emf) yang timbul pada penghantar setiap detik berlaku **hukum tangan kanan Fleming**, lihat pada Gambar 12.14 berikut ini.



Gambar 12. 14. Hukum Tangan Kanan Fleming.

Keterangan Gambar 12.14:

1. **Jempol** menyatakan arah gerak ( $F$ ) atau perputaran penghantar.
2. **Jari telunjuk** menyatakan arah medan magnet dari kutub utara ke kutub selatan (arah  $B$  = arah kerapatan fluks).
3. **Jari tengah** menyatakan arah arus dan tegangan.

Ketiga arah tersebut saling tegak lurus, seperti gambar diatas.

**Tegangan Satu Volt** adalah *GGL (EMF)* atau Tegangan Induksi yang dibangkitkan pada penghantar untuk tiap  $10^8$  garis gaya fluks yang dipotong per detik.

**Tegangan rata-rata yang dibangkitkan dalam satu penghantar ( $E_{av}$ ) sama dengan** garis gaya fluks total yang dipotong dibagi dengan waktu yang digunakan, atau dinyatakan oleh persamaan:

$$E_{av} = \frac{\phi}{t \times 10^8} \text{ volt} \quad (4)$$

dengan:

$E_{av}$  = tegangan rata-rata yang timbul dalam suatu penghantar.

$\phi$  = fluks total yang dipotong oleh penghantar.

$t$  = waktu dalam *second* (detik) yang digunakan untuk memotong fluksnya.

### Contoh Soal 1.

Suatu generator arus searah 4 kutub mempunyai belitan jangkar yang terdiri dari 648 penghantar (konduktor) total yang dihubungkan dalam 2 garis edar

paralel (jalan paralel arus pada penghantar jangkar). Jika fluks per kutub =  $0,321 \times 10^6$  maxwell dan kecepatan perputaran dari jangkar 1800 rpm, hitunglah tegangan rata-rata yang dibangkitkan.

**Penyelesaian:**

Banyaknya penghantar seri per garis edar paralel sama dengan  $\frac{648}{2} = 324$

Banyaknya fluks yang dipotong per putaran:

$$\phi = 4 \times 0,321 \times 10^6 = 1,284 \times 10^6 \text{ maxwell}$$

$$\text{Putaran jangkar per detik} = \frac{1800}{60} = 30 \text{ rps.}$$

Waktu yang digunakan per putaran:

$$t = \frac{1}{30} = 0,0333 \text{ detik}$$

$$\frac{E_{av}}{\text{penghantar}} = \frac{1,284 \times 10^6}{0,0333} \times 10^{-8} = 0,386 \text{ volt}$$

$$E_g \text{ (tegangan total yang dibangkitkan)} = 0,386 \times 324 = 125 \text{ volt}$$

**Contoh Soal 2.**

Dari contoh soal 1 diatas, hitunglah rating arus pada tiap penghantar per garis edar jika daya yang dibangkitkan oleh jangkar adalah 5 kW.

**Penyelesaian:**

Daya (P) dalam watt = Tegangan (V) dalam volt  $\times$  Arus (I) dalam Ampere

$$\text{Arus jangkar total} = \frac{P}{V} = \frac{5000}{125} = 40 \text{ Ampere.}$$

$$\text{Arus per penghantar (per garis edar)} = \frac{40}{2} = 20 \text{ Ampere.}$$

**12.7 Persamaan Umum Tegangan Generator Arus Searah**

Dari contoh soal, dapat disimpulkan bahwa **tegangan total yang dibangkitkan oleh generator arus searah** akan mengikuti persamaan umum berikut,

$$E_g = \frac{\phi \times p \times rpm \times Z}{a \times 60} \times 10^{-8} \text{ volt} \tag{5}$$

dengan,

$$E_g = \text{Tegangan total yang dibangkitkan dalam volt.}$$

$$\phi = \text{Fluks per kutub dalam maxwell.}$$

$$p = \text{Banyaknya kutub.}$$

- $rpm$  = Kecepatan putaran jangkar per menit.
- $Z$  = Jumlah total dari penghantar jangkar yang efektif.
- $a$  = Banyaknya garis edar paralel dari arus pada penghantar jangkar.

**Contoh Soal 3.**

Suatu generator arus searah 6 kutub, 85 kW mempunyai jangkar yang terdiri dari 66 slot (alur) dan tiap alur berisi 12 konduktor. Kumputan jangkar dihubungkan sedemikian sehingga terdapat 6 garis edar paralel. Jika tiap kutub menghasilkan fluks sebesar  $2,18 \times 10^6$  maxwell dan kecepatan per putaran jangkar 870 rpm, hitunglah tegangan yang dibangkitkan.

**Penyelesaian:**

Tegangan yang dibangkitkan :

$$E_g = \frac{\phi \times p \times rpm \times Z}{a \times 60} \times 10^{-8} \text{ volt}$$

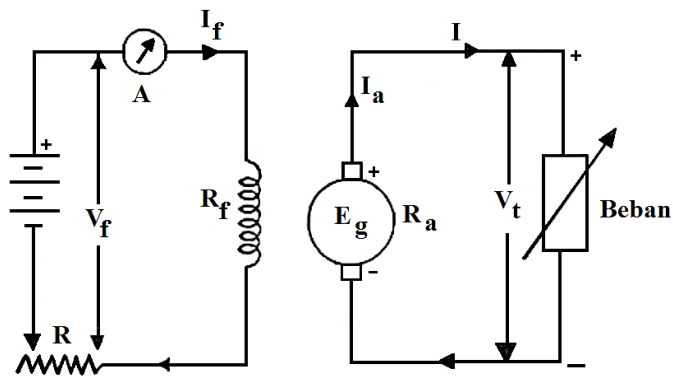
$$E_g = \frac{2,18 \times 10^6 \times 6 \times 870 \times 792}{6 \times 60} \times 10^{-8} \text{ volt} = 250 \text{ volt}$$

**12.8 Jenis-jenis Generator Arus Searah**

Berdasarkan rangkaian penguatannya, maka generator arus searah dibagi atas:

**a. Generator arus searah dengan penguatan terpisah atau penguatan bebas**

Dimana penguatan medan berasal dari sumber arus searah luar seperti Gambar 12.15 berikut.



Gambar 12. 15. Rangkaian ekivalen generator arus searah berpenguatan bebas.

Dari gambar rangkaian ekivalen generator arus searah berpenguatan bebas diatas, dapat dituliskan persamaan yang menyatakan hubungan besaran tegangan, arus, daya dan resistansi sebagai berikut:

$$E_g = V_t + I_a R_a + \Delta v_{si} \quad (6)$$

$$V_f = I_f (R_f + R) \quad (7)$$

$$I_a = I = \frac{P_{output}}{V_t} \quad (8)$$

dengan,

- $E_g$  = Tegangan yang dibangkitkan oleh jangkar dalam volt.
- $V_f$  = Tegangan terminal dalam volt.
- $I_a$  = Arus jangkar dalam Ampere.
- $I$  = Arus beban dalam Ampere.
- $V_f$  = Tegangan sumber arus searah untuk penguatan dalam volt.
- $R_f$  = Resistansi kumparan medan dalam ohm.
- $R_a$  = Resistansi kumparan jangkar dalam ohm.
- $I_f$  = Arus medan dalam Ampere.
- $R$  = Resistansi pengatur arus masuk kumparan medan dalam ohm.
- $\Delta v_{si}$  = Rugi tegangan pada sikat.

$$P_{output} = V_t I \text{ Watt} \quad (9)$$

$P_{output}$  = Daya keluaran jangkar

#### Contoh Soal 4.

Suatu generator arus searah berpenguatan bebas melayani 450 Ampere pada tegangan terminal 230 volt. Resistansi jangkar 0,03 ohm, rugi tegangan pada sikat seluruhnya 2 volt, hitunglah tegangan yang dibangkitkan, jika arus medan untuk membangkitkan fluks dipertahankan sebesar 4 Ampere, tegangan sumber arus searah untuk penguatan sebesar 220 volt serta resistansi kumparan medan 50 ohm, berapa besarnya resistansi pengatur arus masuk kumparan medan?

#### Penyelesaian:

Lihat rangkaian ekivalen generator arus searah berpenguatan bebas pada Gambar 12.15, datanya:

$$I_a = I = 450 \text{ Ampere} ; R_a = 0,03 \text{ ohm}$$

$$V_t = 230 \text{ volt}; \quad V_f = 220 \text{ volt}$$

$$R_f = 50 \text{ ohm}; \quad I_f = 4 \text{ Ampere}$$

Tegangan yang dibangkitkan oleh jangkar ( $E_g$ ):

$$E_g = V_t + I_a R_a + \Delta v_{si}$$

$$E_g = 230 + (450 \times 0,03) + 2 = 245,5 \text{ volt}$$

Resistansi yang dibutuhkan untuk mengatur arus medan:

$$V_f = I_f (R_f + R)$$

$$220 = 4 (50 + R)$$

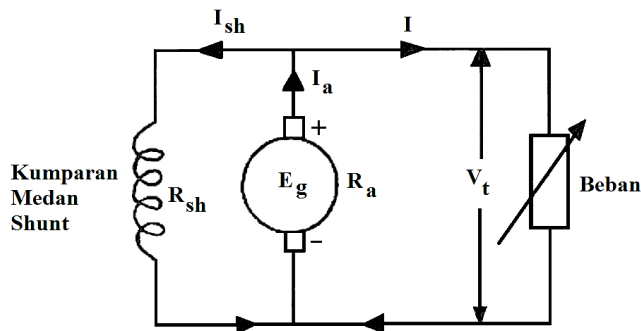
$$R = \frac{20}{4} = 5 \text{ ohm}$$

### b. Generator arus searah dengan penguatan sendiri

Penguatan untuk medan magnetnya diambil dari terminal generator itu sendiri. Karena adanya magnet sisa (*residual magnetism*) menghasilkan fluks medan pada permulaannya. Waktu jangkar berputar maka tegangan terminal akan memperkuat medan magnet dan dari penguatan ini akan menambah tegangan terminal kembali, sampai akhirnya tercapai tegangan nominal dari generator. Ada 3 macam generator ini:

### c. Generator arus searah shunt

Pada generator ini, kumparan medan paralel dengan kumparan jangkar, lihat Gambar 12.16 berikut ini.



Gambar 12. 16. Rangkaian ekivalen generator arus searah shunt.

Dari Gambar 12.16 rangkaian ekivalen generator arus searah shunt diatas, dapat dituliskan persamaan yang menyatakan hubungan besaran tegangan, arus, daya dan resistansi sebagai berikut:

$$E_g = V_t + I_a R_a + \Delta v_{si} \quad (10)$$

$$I_a = I + I_{sh} \quad (11)$$

$$I_{sh} = \frac{V_t}{R_{sh}} \quad (12)$$

$$I = \frac{P_{output}}{V_t} \quad (13)$$

dengan,

$E_g$  = Tegangan yang dibangkitkan pada kumparan jangkar dalam volt.

$V_t$  = Tegangan terminal generator dalam volt.

$R_a$  = Resistansi kumparan jangkar dalam ohm.

$I_a$  = Arus kumparan jangkar dalam Ampere.

$R_{sh}$  = Resistansi kumparan medan shunt dalam ohm.

$I$  = Arus beban dalam Ampere.

$I_{sh}$  = Arus pada kumparan medan shunt dalam Ampere.

$\Delta v_{si}$  = Rugi tegangan pada sikat.

$P_{output}$  = Daya keluaran dalam Watt.

### Contoh Soal 5.

Suatu generator arus searah shunt, 4 kutub, mempunyai 55 alur jangkar, tiap alur berisi 8 penghantar. Bila kecepatan generator 900 rpm, fluks/kutub  $5,6 \times 10^6$  maxwell, dan garis edar paralel 4, hitung *EMF* atau tegangan yang dibangkitkan oleh jangkar. Jika arus jangkar 100 Ampere, resistansi kumparan jangkar 0,05 ohm, rugi tegangan pada semua sikat 2 volt, hitunglah tegangan terminal generator.

#### Penyelesaian:

*EMF* yang dibangkitkan oleh jangkar:

$$E_g = \frac{\phi \times P \times rpm \times Z}{a \times 60} \times 10^{-8} \text{ volt} \quad \text{dengan } Z = 55 \times 8 = 440$$

$$E_g = \frac{5,6 \times 10^6 \times 4 \times 900 \times 440}{4 \times 60} \times 10^{-8} \text{ volt}$$

$$E_g = 369,6 \text{ volt}$$

Gunakan Gambar 12.16, datanya:

$$E_g = 369,6 \text{ volt}; \quad R_a = 0,05 \text{ ohm},$$

$$I_a = 100 \text{ Ampere}$$

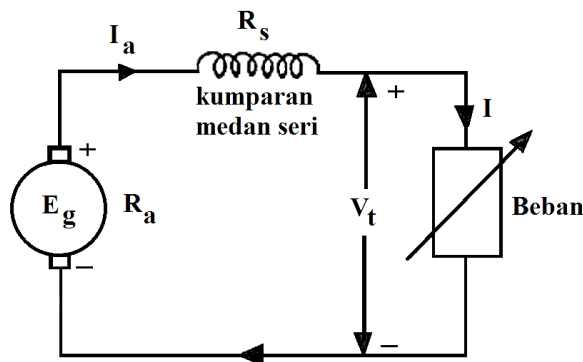
Tegangan terminalnya:

$$V_t = E_g - I_a R_a - \Delta v_{si}$$

$$V_t = 369,6 - (100 \times 0,05) - 2 = 362,6 \text{ volt}$$

#### d. Generator arus searah seri

Pada generator ini kumparan medan diseri dengan kumparan jangkarnya, sehingga medannya mendapat penguatan jika arus bebannya ada, itu sebabnya generator seri selalu terkopel dengan bebannya, jika tidak demikian maka tegangan terminal tidak akan muncul.



Gambar 12. 17. Rangkaian ekivalen generator arus searah seri.

Dari rangkain ekivalen tersebut maka persamaan yang menyatakan hubungan besaran tegangan, arus, daya dan resistansi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$E_g = V_t + I_a R_a + I R_s + \Delta v_{si} \quad (14)$$

$$I_a = I = \frac{P_{output}}{V_t} \quad (15)$$

Keterangan persamaan (14) dan persamaan (15):

- $E_g$  = Tegangan yang dibangkitkan pada kumparan jangkar dalam volt.
- $V_t$  = Tegangan terminal generator dalam volt.
- $R_a$  = Resistansi kumparan jangkar dalam ohm.
- $I_a$  = Arus kumparan jangkar dalam Ampere.

- $R_s$  = Resistansi kumparan medan seri dalam ohm.
- $I$  = Arus beban dalam Ampere.
- $\Delta v_{si}$  = Rugi tegangan pada sikat.

**Contoh Soal 6.**

Suatu generator arus searah seri, 50 kW, 250 volt, resistansi kumparan jangkar 0,1 ohm, rugi tegangan pada sikat tidak ada. Hitunglah:

- a. Arus jangkarnya bila bekerja pada beban penuh.
- b. Resistansi medan seri bila tegangan yang dibangkitkan = 300 volt.

**Penyelesaian:**

Gunakan Gambar 12.17, dengan data berikut:

$$P_{output} = 50 \text{ kW} ; V_t = 250 \text{ volt} ; R_a = 0,1 \text{ ohm}$$

dan  $E_g = 300 \text{ volt}$

- a. Arus jangkarnya:

$$I_a = \frac{P_{output}}{V_t} = \frac{50.000}{250} = 200 \text{ Ampere}$$

- b. Resistansi medan seri:

$$E_g = V_s + I_a R_a + I R_s + \Delta v_{si}$$

$$300 = 250 + (200 \times 0,1) + (200 \times R_s) + 0$$

$$300 = 270 + (200 \times R_s)$$

$$R_s = \frac{30}{200} = 0,15 \text{ ohm}$$

**e. Generator Arus Searah Kompon**

Generator ini mempunyai dua kumparan medan yaitu yang satu diparalel dengan kumparan jangkar, sedangkan yang lain diseri dengan kumparan jangkar.

Generator ini terbagi atas:

- a. Menurut susunan rangkaian kumparan medan.
  - 1. Kompon pendek.
  - 2. Kompon panjang.
- b. Menurut arah arus yang mengalir pada kumparan medan.

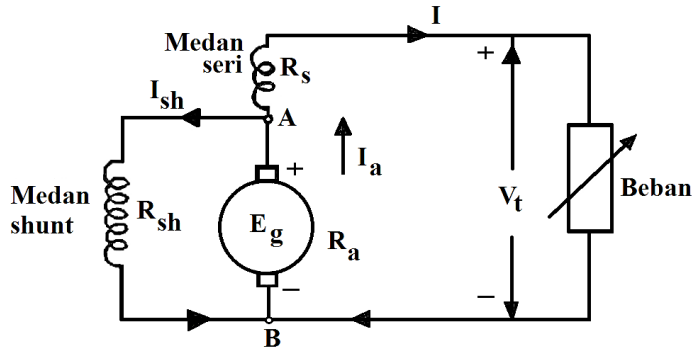
### 1. Kompon kumulatif.

Disebut kompon kumulatif karena arah arus yang mengalir pada kumparan medan seri searah dengan arus yang mengalir di kumparan medan shunt, terbagi atas:

- Kompon lebih (*over compound*)
- Kompon kurang (*under compound*)
- Kompon rata (*flat compound*)

### 2. Kompon diferensial.

Disebut kompon diferensial karena arah arus yang mengalir di medan seri berlawanan arah dengan arus yang mengalir pada medan shunt.



Gambar 12. 18. Rangkaian ekivalen generator arus searah kompon pendek.

Untuk generator kompon, arus yang mengalir pada medan seri ada jika dibebani, kadang-kadang arus beban ini terlalu besar sehingga medan seri perlu diberi resistansi pembagi (*diverter resistance*).

**Berdasarkan susunan rangkaian kumparan medannya maka generator arus searah kompon yang dibahas berikut ini.**

#### a. Generator Arus Searah Kompon Pendek

Rangkaian ekivalen generator arus searah kompon pendek lihat pada Gambar 12.18. Dari Gambar 12.18 rangkaian ekivalen generator arus searah kompon pendek, dapat dituliskan persamaan yang menyatakan hubungan besaran tegangan, arus, daya dan resistansi sebagai berikut:

$$E_g = V_t + I_a R_a + I R_s + \Delta v_{si} \quad (16)$$

$$I_a = I_{sh} + I \quad (17)$$

$$I_{sh} = \frac{V_t + I R_s}{R_{sh}} \quad (18)$$

$$I = \frac{P_{output}}{V_t} \quad (19)$$

dengan,

- $E_g$  = Tegangan yang dibangkitkan pada kumparan jangkar dalam volt.
- $V_t$  = Tegangan terminal generator dalam volt.
- $R_a$  = Resistansi kumparan jangkar dalam ohm.
- $I_a$  = Arus kumparan jangkar dalam Ampere.
- $R_{sh}$  = Resistansi kumparan medan shunt dalam ohm.
- $I$  = Arus beban dalam Ampere.
- $I_{sh}$  = Arus medan shunt dalam Ampere.
- $R_s$  = Resistansi kumparan medan seri dalam ohm.
- $\Delta v_{si}$  = Rugi tegangan pada sikat.

### Contoh Soal 7.

Suatu generator arus searah kompon pendek 20 kW bekerja dengan beban penuh pada tegangan terminal 250 volt. Resistansi kumparan jangkar, kumparan medan seri dan kumparan medan shunt masing-masing sebesar 0,05 ohm, 0,025 ohm, dan 100 ohm. Hitung tegangan yang harus dibangkitkan oleh jangkar.

### Penyelesaian:

Pada Gambar 12.18, dengan data berikut,

$$P_{output} = 20 \text{ kW} ; V_t = 250 \text{ volt}$$

$$R_a = 0,05 \text{ ohm} ; R_s = 0,025 \text{ ohm} \text{ dan } R_{sh} = 100 \text{ ohm}$$

$$I = \frac{P_{output}}{V_t} = \frac{20.000}{250} = 80 \text{ Ampere}$$

$$I_{sh} = \frac{V_t + I R_s}{R_{sh}} = \frac{250 + (80 \times 0,025)}{100} = 2,48 \text{ Ampere}$$

$$I_a = I + I_{sh} = 80 + 2,48 = 82,48 \text{ Ampere}$$

Tegangan yang dibangkitkan oleh jangkar:

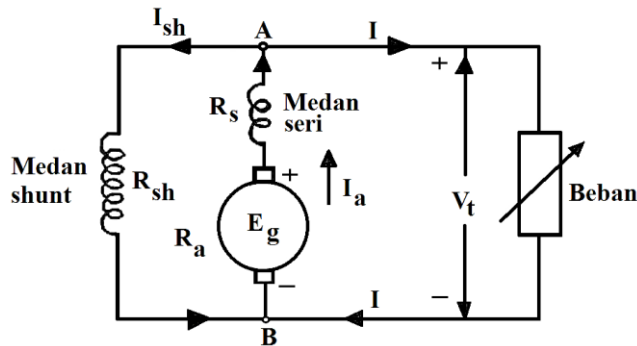
$$E_g = V_t + I_a R_a + I R_s + \Delta v_{si}$$

$$E_g = 250 + (82,48 \times 0,05) + (80 \times 0,025) + 0$$

$$E_g = 250 + 4,12 + 2 = 256,12 \text{ volt}$$

### b. Generator Arus Searah Kompon Panjang

Rangkaian ekivalen generator arus searah kompon panjang, lihat pada Gambar 12.19 berikut ini.



Gambar 12. 19. Rangkaian ekivalen generator arus searah kompon panjang.

Dari gambar rangkaian ekivalen tersebut maka persamaan yang menyatakan hubungan besaran tegangan, arus, daya dan resistansi dapat dituliskan sebagai berikut,

$$E_g = V_t + I_a R_a + I_a R_s + \Delta v_{si} \quad (20)$$

$$I_a = I_{sh} + I \quad (21)$$

$$I_{sh} = \frac{V_t}{R_{sh}} \quad (22)$$

$$I = \frac{P_{output}}{V_t} \quad (23)$$

Keterangan persamaan (20) sampai (23) sebagai berikut:

- $E_g$  = Tegangan beban dalam volt.
- $V_t$  = Tegangan terminal generator dalam volt.
- $R_a$  = Resistansi kumparan jangkar dalam ohm.
- $I_a$  = Arus kumparan jangkar dalam Ampere.
- $R_{sh}$  = Resistansi kumparan medan shunt dalam ohm.

- $I$  = Arus beban dalam Ampere.
- $I_{sh}$  = Arus medan shunt dalam Ampere.
- $R_s$  = Resistansi kumparan medan seri dalam ohm.
- $\Delta v_{si}$  = Rugi tegangan pada sikat.

**Contoh Soal 8.**

Suatu generator kompon panjang melayani beban 50 amper pada tegangan terminal 500 volt, mempunyai resistansi jangkar, medan seri dan medan shunt masing-masing 0,05 ohm; 0,03 ohm dan 250 ohm. Rugi tegangan sikat 1 volt per sikat. Jika output prime mover atau penggerak mula 27,5 kW, hitunglah:

- a. Tegangan yang dibangkitkan oleh jangkar.
- b. Efisiensi dari generator.

**Penyelesaian:**

Gunakan Gambar 12.19, dengan data berikut:

$$I = 50 \text{ Ampere}; \quad V_t = 500 \text{ volt}; \quad R_a = 0,05 \text{ ohm}$$

$$R_s = 0,03 \text{ ohm}; \quad R_{sh} = 250 \text{ ohm}$$

$$a. \quad I_{sh} = \frac{V_t}{R_{sh}} = \frac{500}{250} = 2 \text{ Ampere}$$

$$I_a = I + I_{sh} = 50 + 2 = 52 \text{ Ampere}$$

$$E_g = V_t + I_a R_s + I_a R_a + \Delta v_{si}$$

$$E_g = 500 + (52 \times 0,03) + (52 \times 0,05) + (2 \times 1)$$

$$E_g = 506,16 \text{ volt}$$

- b. Output penggerak mula menjadi daya input ( $P_{input}$ ) dari generator = 27,5 kW; sedangkan daya output generator ( $P_{output}$ ) =  $V_t \times I = 500 \times 50 = 25 \text{ kW}$ .

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{P_{output}}{P_{input}} = \frac{25}{27,5} = 90,9\%$$

## 12.9 Karakteristik (Watak) Generator Arus Searah

Karakteristik yang penting pada generator arus searah adalah sebagai berikut:

### 1. Karakteristik Beban Nol.

Bila generator shunt, kompon dan generator berpenguatan bebas diputar oleh penggerak mula, kemudian diberi arus penguatan, maka pada terminalnya dibangkitkan tegangan. Tegangan tersebut tergantung pada:

- a. **Fluks (arus medan).**
- b. **Kecepatan putar.**

Jika fluks  $\phi$  (arus medan  $I_f$ ) dipertahankan **konstan** sedangkan **kecepatan  $N$  dinaikkan dan diturunkan** maka **tegangan terminal akan naik turun sesuai perubahan kecepatan.**

Sama halnya jika kecepatan  $N$  ditahan **konstan** sedang fluks  $\phi$  (arus medan  $I_f$ ) **diubah-ubah** maka **tegangan terminalnya** juga akan berubah sesuai dengan perubahan fluks. Dengan demikian ada 2 macam karakteristik, yaitu:

- a. **Karakteristik beban nol sebagai fungsi dari arus medan dengan putaran konstan**, dinyatakan oleh persamaan berikut,

$$E_o = E_o(I_f) \Big|_{N=\text{konstan}}^{I_a=0} \quad (24)$$

dengan,

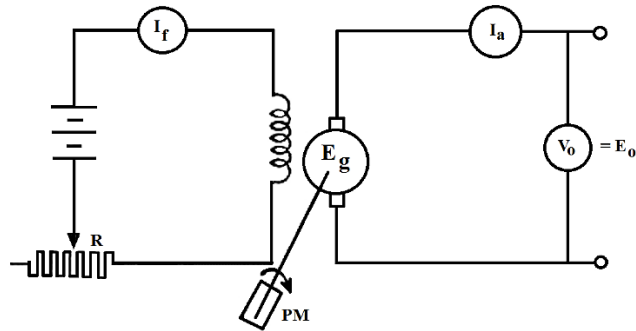
$E_o$  = Tegangan terminal waktu beban nol.

$I_f$  = Arus medan

$I_a$  = Arus beban = 0

$N$  = kecepatan generator, konstan

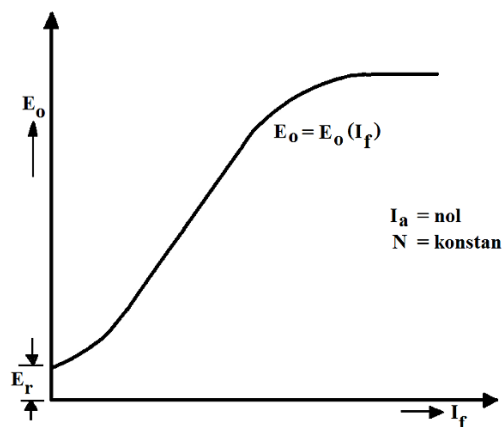
Karakteristik ini didapatkan dengan rangkaian ekivalen pengujian berikut.



Gambar 12. 20. Rangkaian ekivalen pengujian beban nol generator arus searah.

Pelaksanaan pengujian dengan cara berikut:

1. Putar generator sampai putaran nominal, pakai penggerak mula.
2. Sebelumnya posisikan kontak geser dari rheostat pada rangkaian medan dengan resistansi ( $R$ ) yang maksimum sehingga arus medan ( $I_f$ )=0.
3. Tegangan pada voltmeter  $V_o$  sudah ada walaupun arus medan masih nol, sebesar  $E_r$  = tegangan sisa fluks (residual fluks).
4. Arus medan naikan setingkat demi setingkat dengan menggeser kontak geser rheostat, catat  $I_f$  dan  $E_o$ .
5. Pengujian dihentikan setelah kontak geser rheostat habis ( $R$  minimum).
6. Jika digambarkan pengamatannya, diperoleh kurva karakteristik saturasi beban nol berikut ini.



Gambar 12. 21. Kurva karakteristik saturasi beban nol generator arus searah.

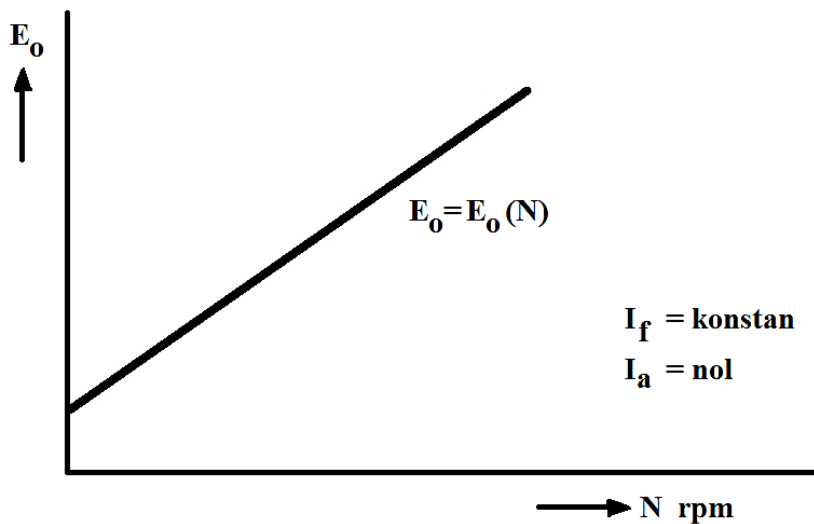
b. **Karakteristik beban nol sebagai fungsi dari putaran dengan arus medan konstan**, dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$E_o = E_o(N) \Big|_{\substack{I_a = nol \\ I_f = konstan}} \quad (25)$$

dengan,  $E_o$ ;  $I_f$ ;  $I_a$  dan  $N$  seperti keterangan untuk persamaan (24) demikian pula rangkaian ekivalen pengujiannya sama dengan Gambar 12.20, pelaksanaan pengujian sebagai berikut:

1. Putar generator sampai putaran nominal dengan mengatur penggerak mula.
2. Atur arus medan sehingga tegangan terminal generator mencapai tegangan nominal.
3. Putaran generator diturunkan setingkat demi setingkat tanpa mengubah arus medan, setiap diturunkan putaran, catat besarnya dan juga catat tegangan terminal generator.

Hasil pengamatan pengujian diatas kalau digambarkan akan didapatkan kurva karakteristik generator arus searah pada waktu beban nol sebagai fungsi dari putaran dan arus medan konstan, lihat Gambar 12.22 berikut ini.

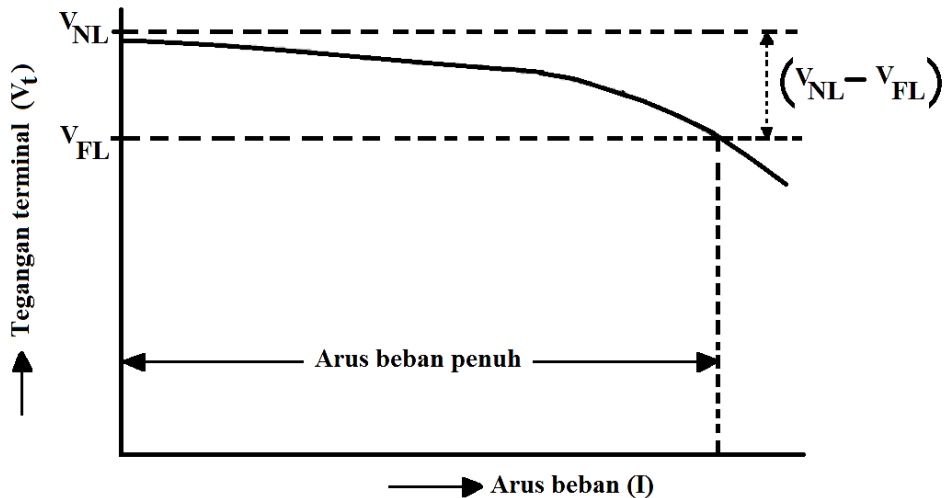


Gambar 12. 22. Kurva karakteristik generator arus searah pada waktu beban nol sebagai fungsi dari putaran dan arus medan konstan.

## 2. Karakteristik waktu berbeban

### a. Karakteristik Luar Generator Shunt waktu dibebani.

Waktu generator shunt sudah berputar dan tegangan terminalnya sudah ada, kemudian dibebani maka tegangan terminalnya akan turun, lihat Gambar 12.23 berikut ini.



Gambar 12. 23. Kurva karakteristik generator arus searah shunt waktu dibebani.

Dari Gambar 12.23 kurva karakteristik generator arus searah shunt waktu dibebani, bila beban dilepas maka tegangan terminalnya ( $V_t$ ) akan kembali dari tegangan beban penuh ( $V_{FL}$ ) ke tegangan beban nol ( $V_{NL}$ ).

Watak kerja generator arus searah berdasarkan perubahan tegangan antara beban penuh dan beban nol didapatkan apa yang disebut regulasi tegangan, yang dapat dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$\% \text{Regulasi} = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \quad (26)$$

dengan,

$V_{NL}$  = Tegangan terminal waktu beban nol.

$V_{FL}$  = Tegangan waktu beban penuh.

### Contoh Soal 9.

Suatu generator arus searah shunt 25 kW, 230 volt mempunyai regulasi tegangan sebesar 8,7%, ditanyakan:

- Berapa tegangan terminal generator pada waktu beban nol.
- Jika perubahan tegangan diandaikan seragam antara beban nol dan beban penuh, hitung daya keluaran (output) generator bila tegangan terminal 240 volt dan 235 volt.
- 

#### Penyelesaian:

$$a. \% \text{Regulasi} = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100$$

$$8,7 = \frac{V_{NL} - 230}{230} \times 100 \Rightarrow V_{NL} = \frac{8,7 \times 230}{100} + 230 = 250 \text{ volt}$$

$$b. P_{240} = \frac{250 - 240}{250 - 230} \times 25 = 12,5 \text{ kW}$$

$$P_{235} = \frac{250 - 240}{250 - 230} \times 25 = 18,75 \text{ kW}$$

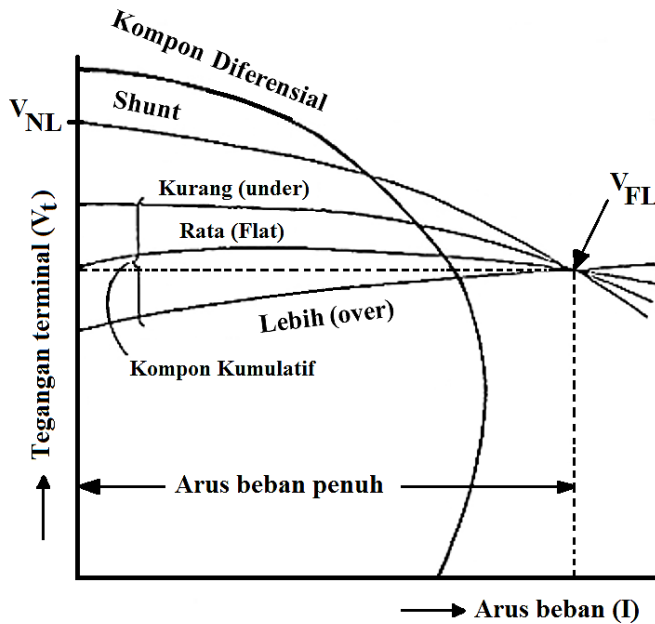
### b. Karakteristik Generator Kompon waktu dibebani.

Generator kompon mempunyai dua belitan medan yakni medan shunt dan medan seri. Penguatan medan shunt dapat dikatakan kurang stabil karena harganya hanya bergantung pada fluktuasi tegangan terminal.

Akan tetapi penguatan medan seri berubah-ubah tergantung dari arus beban, jika arus beban nol maka fluksnya tidak ada.

Jika lilitan medan shunt dan medan seri pada kutub-kutub utama dihubungkan sedemikian sehingga keduanya menghasilkan fluks yang arahnya sama (fluksnya saling menambah) disebut **kompon kumulatif**, jika keduanya menghasilkan fluks yang berlawanan arah (fluksnya saling mengurangi) yang demikian disebut **kompon diferensial**.

Karakteristik generator kompon waktu dibebani dapat digambarkan sebagai berikut (lihat Gambar 12.24).



Gambar 12. 24. Kurva karakteristik generator arus searah dari berbagai jenis kompon waktu dibebani.

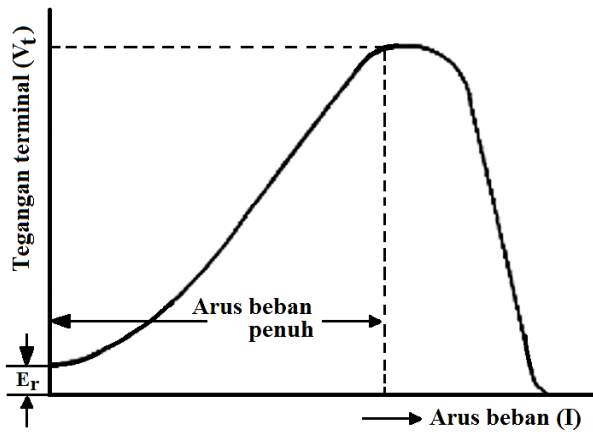
Keterangan Gambar 12.24:

1. **Kompon kumulatif rata** (*flat cummulative compound*), tegangan terminal pada waktu berbeban sama dengan tegangan terminal waktu beban nol.
2. **Kompon kumulatif lebih** (*over cummulative compound*), tegangan terminalnya pada waktu berbeban, lebih tinggi dari tegangan terminal pada waktu beban nol.
3. **Kompon kumulatif kurang** (*under cummulative compound*), tegangan terminal pada waktu beban penuh lebih rendah dari tegangan terminal pada waktu beban nol.

### c. Karakteristik Generator Seri waktu dibebani.

Generator seri, lilitan medannya diseri dengan jangkar sehingga secara otomatis arus bebannya menjadi arus penguat medan, tegangan terminalnya akan tergantung pada arus beban, jika bebannya nol maka tegangan terminalnya hanya sebesar fluks sisa ( $E_r$ ).

Karakteristik tegangan terminal sebagai fungsi dari arus beban, untuk generator seri dapat digambarkan sebagai berikut (lihat Gambar 12.25).



Gambar 12. 25. Kurva karakteristik generator arus searah seri waktu dibebani.

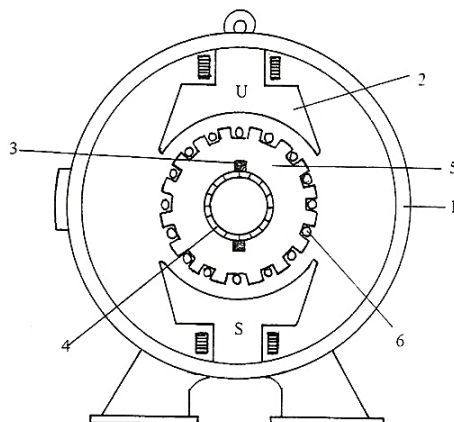
Keterangan Gambar 12.25:

**Tegangan terminal** akan naik sesuai dengan naiknya arus beban, akan tetapi jika arus bebannya di atas nilai nominalnya, bagian inti besi dari untai magnetnya akan saturasi, pada kondisi ini *emf* generator akan turun.

### 12.10 Soal Latihan

#### Soal Teori:

1. Jelaskan bagaimana konstruksi dari mesin arus searah.
2. Jelaskan bagian-bagian konstruksi dan fungsinya sesuai urutan nomor pada Gambar 12.26 berikut ini.



Gambar 12. 26. Stator dan rotor mesin dc.

3. Apa kegunaan komutator pada generator arus searah.
4. Jelaskan prinsip kerja generator arus searah.
5. Jelaskan persamaan umum dari emf yang dibangkitkan oleh generator arus searah.
6. Jelaskan jenis-jenis generator arus searah.
7. Apa sebabnya generator arus searah seri harus dikopel dengan bebannya?
8. Jelaskan dan gambarkan watak-watak dari berbagai generator arus searah?
9. Jelaskan regulasi tegangan pada generator arus searah.

**Soal Perhitungan:**

1. Generator shunt 100 kW, 250 volt pada beban kerja (*rated load*) tegangan yang diinduksikan pada jangkar sebesar 285 volt, arus pada lilitan penguatnya 6A. Tentukan besarnya tahanan jangkar ( $R_a$ ).
2. Sebuah generator dengan penguat terpisah mempunyai data-data sebagai berikut:
  - Tegangan jepit = 234 volt
  - Tahanan beban = 117 ohm
  - Tahanan lilitan jangkar = 1 ohm
 Hitunglah besarnya:
  - a. Arus jangkar (angker)  $I_a$ .
  - b. Besarnya ggl induksi E, jika kerugian tegangan pada sikat-sikat diabaikan.
3. Sebuah generator dengan penguat shunt mempunyai data sebagai berikut:
  - Tegangan jepit (klem) = 240 volt
  - Tahanan lilitan penguat magnet shunt = 240 ohm
  - Tahanan lilitan jangkar = 1 ohm
  - Tahanan beban = 10 ohm
 Hitunglah besarnya:
  - a. Arus jangkar (angker)  $I_a$ .
  - b. GGL induksi E jika kerugian tegangan pada sikat diabaikan.

4. Sebuah generator shunt dengan data-data:
- Tahanan jepit = 240 volt
  - Tahanan lilitan jangkar = 1 ohm
  - Tahanan lilitan penguat magnet = 240 ohm
  - Beban maksimum yang dapat dilayani = 5.000 watt
  - Rugi-rugi gesek = 476 watt,  $\Delta v_{si} = 0$ .
- Hitunglah besarnya:
- a. Efisiensi listrik.
  - b. Efisiensi brutto.
  - c. Efisiensi generator.

# BAB 13

## GENERATOR SINKRON

### 13.1 Pendahuluan

Sebagaimana pada mesin arus searah dan mesin tak serempak maka mesin serempak dibagi atas dua macam:

1. **Generator serempak (generator sinkron = generator arus bolak-balik = alternator** yang banyak digunakan pada pembangkit tenaga listrik).
2. **Motor serempak (motor sinkron)**, dapat digunakan untuk memutar/menggerakkan mesin-mesin produksi di pabrik atau industri yang memerlukan putaran tetap.  
Biasanya harganya mahal dan dipesan khusus. Konstruksi dari mesin serempak baik sebagai generator maupun sebagai motor adalah sama, perbedaan hanya pada prinsip kerjanya.

Pada generator serempak kapasitas kecil, kumparan jangkar ditempatkan pada jangkar (rotor), sedangkan kumparan medan ditempatkan pada stator. Tetapi, pada generator serempak dengan kapasitas besar, kumparan jangkar ditempatkan pada stator, sedangkan kumparan medan ditempatkan pada rotor dengan alasan:

1. Kumparan jangkar lebih kompleks dari pada kumparan medan sehingga lebih mudah dan lebih terjamin ditempatkan pada struktur yang diam serta tegar yaitu di stator.
2. Lebih mudah mengisolasi dan melindungi kumparan jangkar terhadap tegangan yang tinggi.
3. Pendinginan kumparan jangkar mudah karena inti stator yang dibuat cukup besar sehingga dapat didinginkan dengan udara paksa.
4. Kumparan medan mempunyai tegangan rendah sehingga dapat efisien bila dipakai pada kecepatan yang tinggi.

Pada umumnya, generator serempak ukurannya lebih besar dari pada generator arus searah, demikian pula kapasitasnya, karena disini tidak diperlukan lagi komutator.

### 13.2 Generator Sinkron

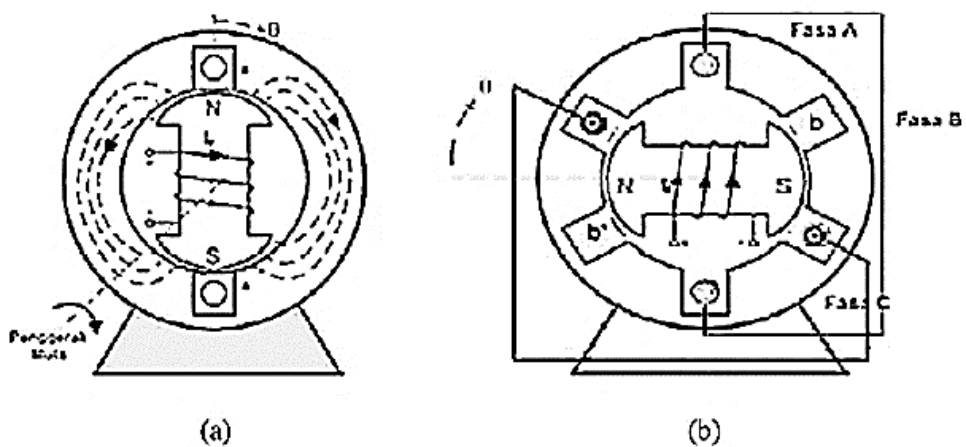
Konversi energi elektromagnetik yaitu perubahan energi dari bentuk mekanik ke bentuk listrik dan bentuk listrik ke bentuk mekanik. Generator sinkron (alternator) merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak-balik dengan cara mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi mekanis diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula (*prime mover*), sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya.

Generator sinkron dengan definisi sinkronnya, mempunyai makna bahwa frekuensi listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut. Rotor generator sinkron yang terdiri dari kumparan medan dengan suplai arus searah akan menghasilkan medan magnet yang diputar dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan putar rotor.

Generator arus bolak – balik dibagi menjadi dua jenis, yaitu:

- Generator arus bolak – balik 1 fasa
- Generator arus bolak – balik 3 fasa

Gambar diagram kedua bentuk generator arus bolak – balik tersebut dapat dilihat dari Gambar 13.1 berikut.



Gambar 13. 1. (a) Generator ac satu fasa dua kutub, dan (b) Generator ac tiga fasa dua kutub.

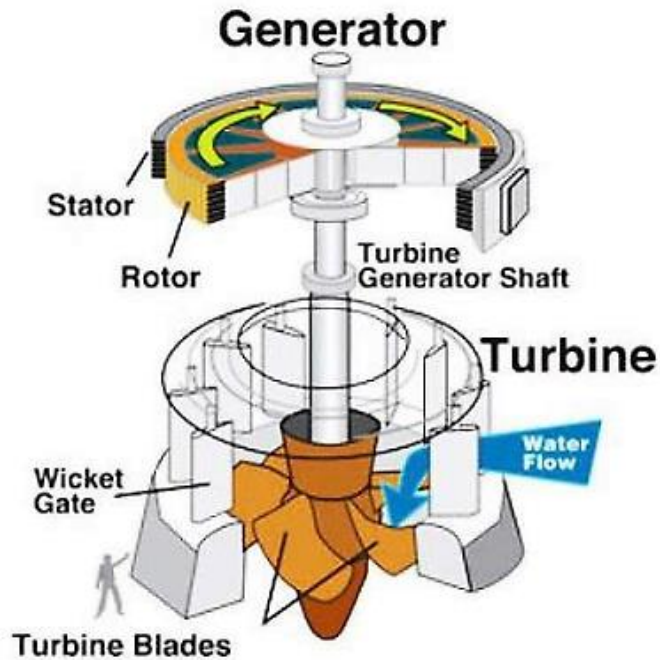
Generator sinkron sering dijumpai pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik (dengan kapasitas yang relatif besar). Misalnya pada PLTA, PLTU, PLTD dan lain-lain. Selain generator dengan kapasitas besar, kita mengenal juga generator dengan kapasitas yang relatif kecil, misalnya generator yang digunakan untuk penerangan darurat yang sering disebut **Generator Set**.

Generator sinkron (sering disebut **alternator**) adalah mesin listrik yang digunakan untuk mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik dengan perantara induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet dengan kumparan generator. Pergerakan relatif adalah terjadinya perubahan medan magnet pada kumparan jangkar (tempat terbangkitnya tegangan pada generator) karena pergerakan medan magnet terhadap kumparan jangkar atau sebaliknya.

**Alternator** ini disebut **generator sinkron** (sinkron = serempak) karena **kecepatan perputaran medan magnet yang terjadi sama dengan kecepatan perputaran rotor generator**. Alternator ini menghasilkan energi listrik bolak balik (*alternating current, ac*) dan biasa diproduksi untuk menghasilkan listrik ac 1-fasa atau 3-fasa.

### 13.3 Generator Sinkron Sebagai Pembangkit Energi Listrik

Generator sinkron banyak digunakan sebagai pembangkit energi listrik berkapasitas besar, seperti yang diterapkan pada PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air), PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas), PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir), dan pembangkit listrik lainnya. **Pada PLTA**, generator digerakkan oleh tenaga air. Air ini ditampung pada sebuah dam dan dialirkan melalui pipa ke turbin generator untuk memutar turbin tersebut, sehingga rotor generator berputar. Akibat perputaran rotor pada generator ini, maka timbul tegangan pada kumparan jangkar generator. Bentuk gambaran penggunaan generator pada PLTA ini diperlihatkan pada Gambar 13.2.



Gambar 13. 2. Hubungan generator dan turbin pada PLTA.

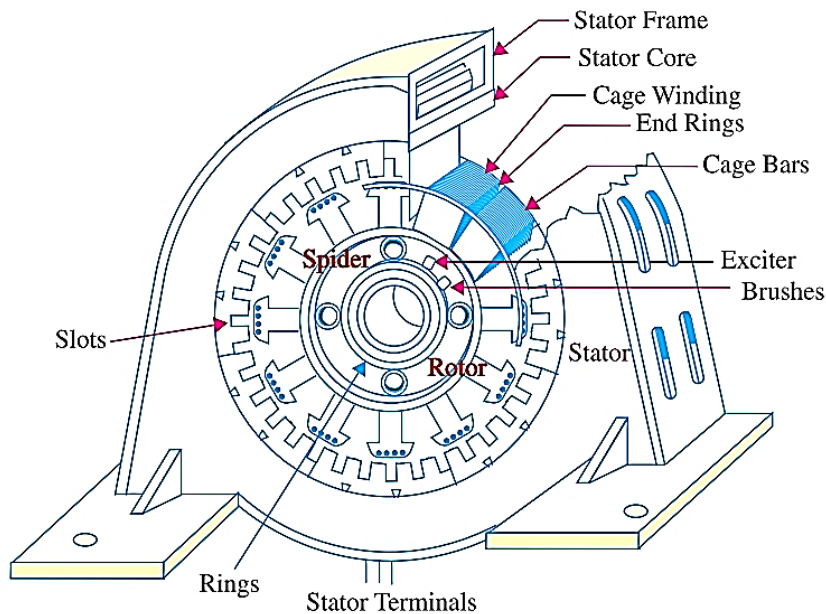
### 13.4 Konstruksi Generator Sinkron

Konstruksi mesin serempak baik untuk generator maupun untuk motor terdiri dari:

1. **Stator** adalah bagian dari mesin yang diam dan berbentuk silinder.
2. **Rotor** adalah bagian dari mesin yang juga berbentuk silinder.
3. **Celah** udara adalah ruangan antara stator dan rotor.

Generator sinkron mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik bolak-balik secara elektromagnetik. Energi mekanik berasal dari penggerak mula yang memutar rotor, sedangkan energi listrik dihasilkan dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan-kumparan stator. Pada Gambar 13.3 dapat dilihat bentuk sederhana dari sebuah generator sinkron.

Secara umum generator sinkron terdiri atas stator, rotor, dan celah udara. Stator merupakan bagian dari generator sinkron yang diam sedangkan rotor adalah bagian yang berputar. Celah udara adalah ruang antara stator dan rotor.



Gambar 13. 3. Konstruksi generator sinkron.

Pada bagian ini akan dibahas mengenai konstruksi generator sinkron secara garis besar. Bagian – bagian generator yang dibahas pada bagian ini antara lain :

- (a) Stator
- (b) Rotor

### 1. Stator

**Stator** (*armature*) adalah bagian yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Arus ac yang menuju ke beban disalurkan melalui stator. Komponen ini berbentuk sebuah rangka silinder dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak.

**Stator** terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu:

- a. **Rangka stator.** Rangka stator merupakan rumah (kerangka) yang menyangga inti jangkar generator.
- b. **Inti Stator.** Inti stator terbuat dari laminasi-laminasi baja campuran atau besi magnetik khusus terpasang ke rangka stator.
- c. **Alur (slot) dan Gigi.** Alur dan gigi merupakan tempat meletakkan kumparan stator. Ada 3 (tiga) bentuk alur stator yaitu terbuka, setengah terbuka, dan tertutup seperti pada Gambar 13.4 berikut ini.



Gambar 13. 4. Bentuk-bentuk alur.

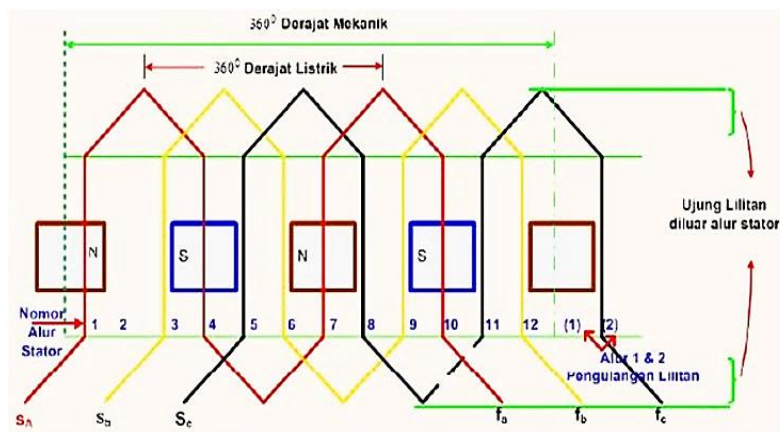
**d. Kumbaran Stator (Kumbaran Jangkar)**

Kumbaran jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumbaran ini merupakan tempat timbulnya ggl induksi. Tipe lilitan kumbaran jangkar (stator) yang umum digunakan oleh mesin sinkron tiga fasa, ada dua tipe yaitu:

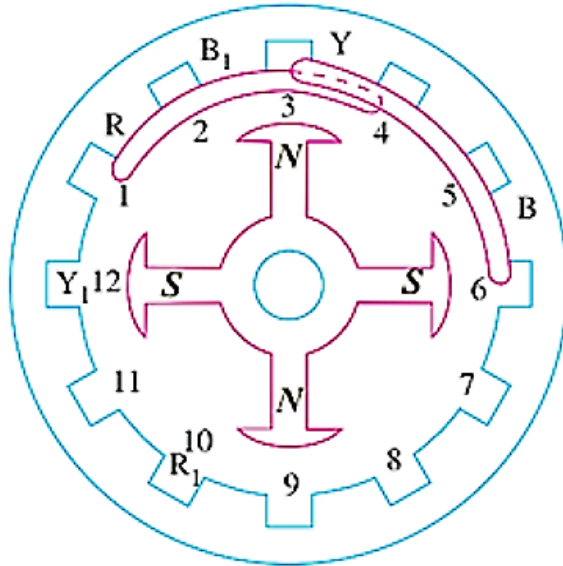
**(i) Lilitan kumbaran satu lapis (Single Layer Winding).**

Gambar 13.5 memperlihatkan kumbaran satu lapis karena hanya ada satu sisi lilitan di dalam masing - masing alur. Bila kumbaran tiga fasa dimulai pada  $S_a, S_b,$  dan  $S_c$  dan berakhir di  $F_a, F_b,$  dan  $F_c$  bisa disatukan dalam dua cara, yaitu hubungan bintang dan segitiga. Antar kumbaran fasa dipisahkan sebesar  $120^\circ$  listrik atau  $60^\circ$  mekanis, satu siklus ggl penuh akan dihasilkan bila rotor dengan 4 kutub berputar  $180^\circ$  mekanis. **Satu siklus ggl penuh** menunjukkan  $360^\circ$  listrik, adapun hubungan antara sudut rotor mekanis  $\alpha_{mekanis}$  dan sudut listrik  $\alpha_{listrik}$ , adalah:

$$\alpha_{listrik} = \frac{P}{2} \alpha_{mekanis} \tag{1}$$

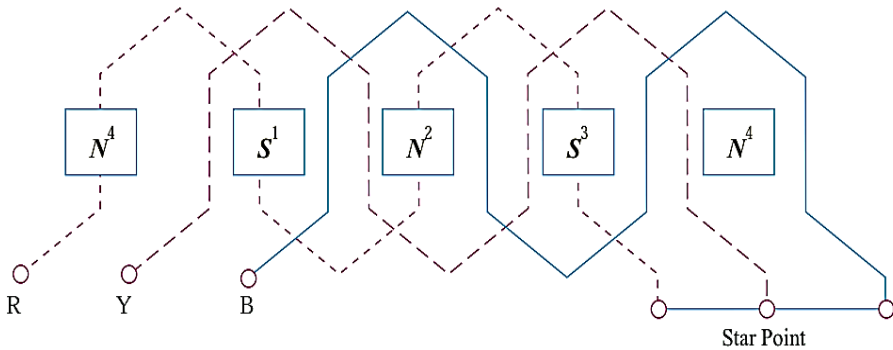


Gambar 13. 5. Lilitan kumbaran satu lapis generator sinkron tiga fasa.



Gambar 13. 6. Generator sinkron 4 kutub lilitan kumparan satu lapis.

Gambar 13.6 memperlihatkan lilitan kumparan satu lapis, satu putaran, kisar penuh untuk generator sinkron 4 kutub. Ada 12 slot, dengan 3 slot per kutub atau 1 slot/fasa/kutub. Terlihat bahwa ada 3 kisar kutub.



Gambar 13. 7. Hubungan lilitan kumparan pada fasa  $R$ ,  $Y$  dan  $B$  dengan ujung kumparan digabungkan membentuk hubungan  $Y$ .

Untuk memperoleh  $EMF$  maksimum, dua sisi kumparan harus sebagian satu kisar penuh, yaitu rentang lilitan kumparan sama dengan satu kisar penuh. Selain itu, jika sisi kumparan dibawah pusat kutub  $N$ ,

maka sisi lainnya pada **kumparan yang sama** akan berada dibawah pusat kutub **S**, yaitu terpisah  $180^{\circ}$  listrik. Dalam hal ini, *EMF* induksi pada dua sisi kumparan dijumlahkan bersama.

Dari Gambar 13.6 diatas, fasa **R** start pada slot No.1, menuju slot 4, 7 dan berakhir pada slot No.10. Fasa **Y** start  $120^{\circ}$  setelahnya, yaitu: dari slot No.3 yang merupakan dua slot selanjutnya setelah fasa **R** start (karena ketika ada 3 slot berhubungan  $180^{\circ}$  listrik, maka akan ada 2 slot yang terhubung dengan pergeseran sudut sebesar  $120^{\circ}$  listrik). Fasa **Y** akan menuju slot 6, 9 dan berakhir di slot No.12.

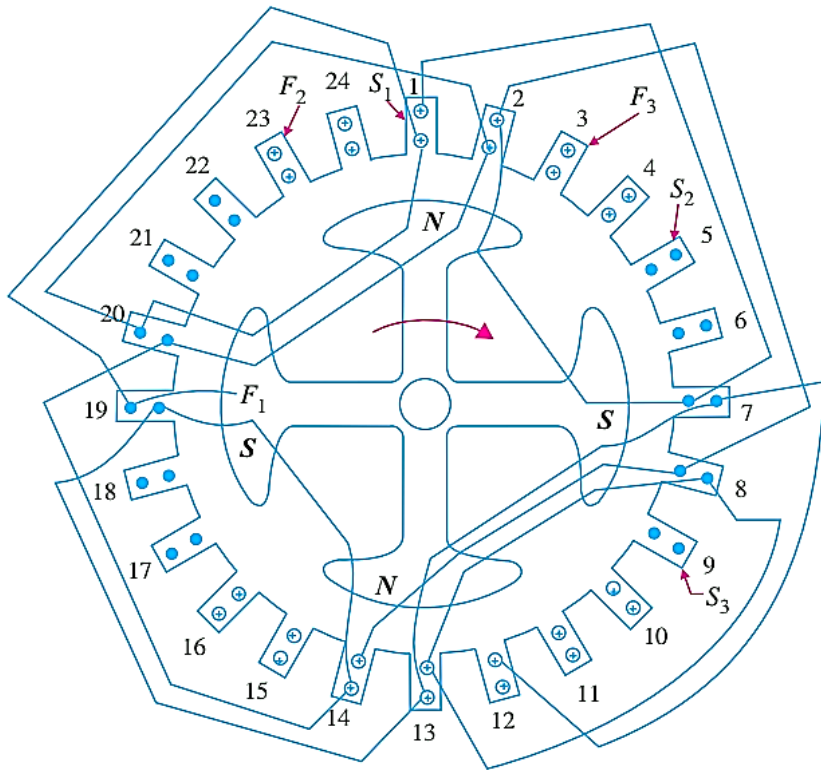
Demikian juga, fasa **B** start dari slot No.5, yaitu dua slot setelah slot tempat fasa **Y** start. Fasa **B** menuju slot 8, 11 dan berakhir pada slot No.2. Diagram hubungan fasa-fasa tersebut pada kumparan diperlihatkan pada Gambar 13.7. Ujung dari kumparan digabungkan untuk membentuk titik bintang untuk hubungan **Y**.

(ii) **Lilitan kumparan berlapis ganda (*Double Layer Winding*).**

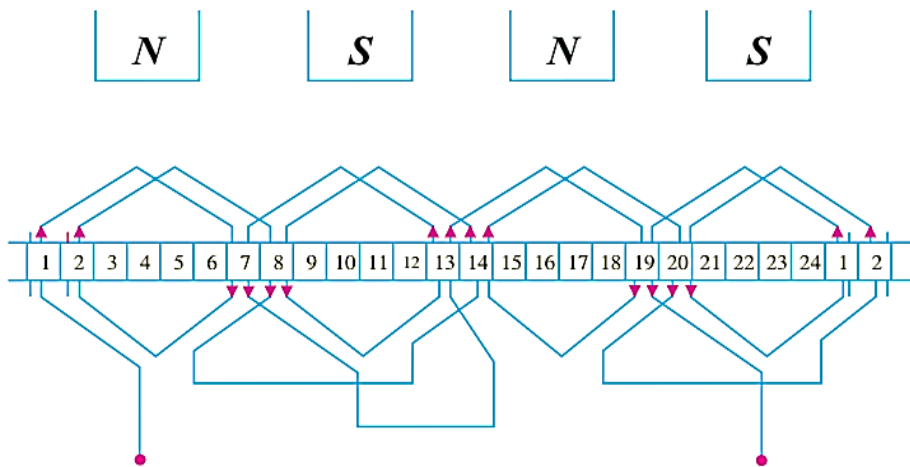
Kumparan jangkar yang diperlihatkan hanya mempunyai satu lilitan per kutub per fasa, akibatnya masing – masing kumparan hanya ada dua lilitan secara seri. Bila alur-alur tidak terlalu lebar, masing-masing penghantar yang berada dalam alur akan membangkitkan tegangan yang sama. Masing – masing tegangan 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 fluks 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.

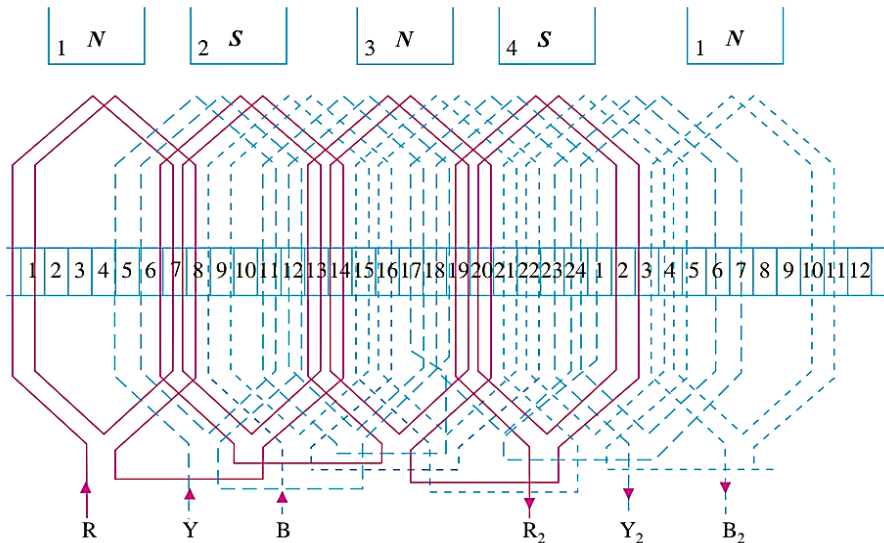
Gambar 13.8 memperlihatkan bagian dari sebuah kumparan jangkar yang secara umum banyak digunakan. Pada masing masing alur ada dua sisi lilitan dan masing–masing lilitan memiliki lebih dari satu putaran. Bagian dari lilitan yang tidak terletak ke dalam alur biasanya disebut *winding overhang*, sehingga tidak ada tegangan dalam *winding overhang*.



Gambar 13. 8. Kumbaran lapis ganda stator mesin sinkron 4 kutub, 24 slot.



Gambar 13. 9. Grup lapis ganda kumbaran stator satu fasa dihubungkan bersama pada kutub-kutub yang berlawanan secara bergantian.



Gambar 13. 10. Kumpanan lapis ganda generator sinkron tiga fasa.

## 2. Rotor

Rotor terdiri dari tiga komponen utama yaitu:

### a. Slip Ring

*Slip ring* merupakan cincin logam yang melingkari poros rotor tetapi dipisahkan oleh isolasi tertentu. Terminal kumparan rotor dipasang ke *slip ring* ini kemudian dihubungkan ke sumber arus searah melalui sikat (*brush*) yang letaknya menempel pada *slip ring*.

### b. Kumparan Rotor (Kumparan Medan)

Kumparan medan merupakan unsur yang memegang peranan utama dalam menghasilkan medan magnet. Kumparan ini mendapat arus searah dari sumber eksitasi tertentu.

### c. Poros Rotor

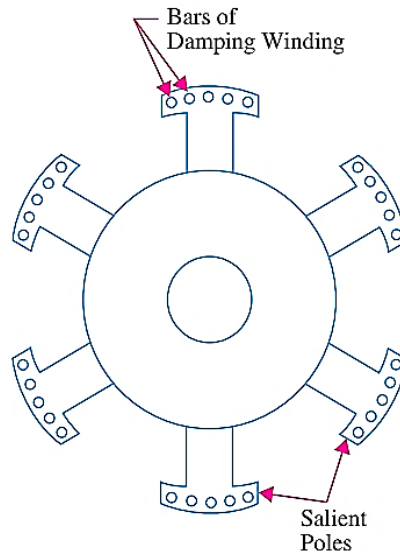
Poros rotor merupakan tempat meletakkan kumparan medan, dimana pada poros rotor tersebut telah dibentuk slot-slot secara paralel terhadap poros rotor.

Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa *silent pole* (kutub menonjol) dan *non silent pole* (kutub silinder).

### a. Jenis Kutub Menonjol (*Silent Pole*)

Pada jenis *silent pole*, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Kumparan-kumparan medannya dihubungkan seri. Ketika kumparan medan ini disuplai oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub berlawanan.

Gambaran bentuk kutub menonjol generator sinkron seperti diperlihatkan pada Gambar 13.11 berikut ini.

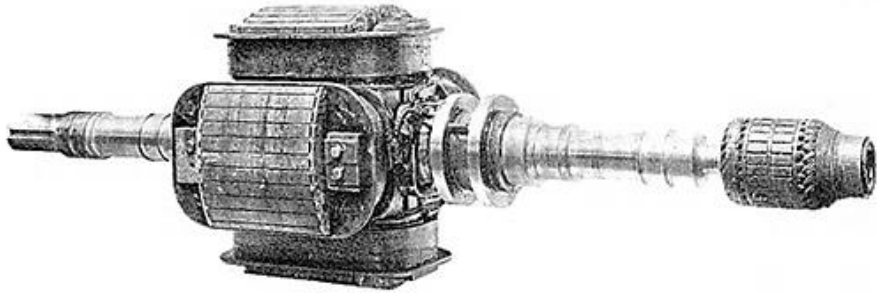


Gambar 13. 11. Rotor kutub menonjol.

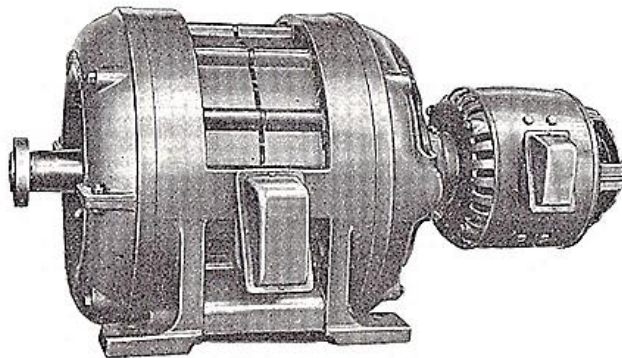
Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah dan sedang (120-400 rpm). Generator sinkron tipe seperti ini biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik.

Rotor kutub menonjol baik digunakan untuk putaran rendah dan sedang karena:

- Kutub menonjol akan mengalami rugi-rugi angin yang besar dan bersuara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi.
- Konstruksi kutub menonjol tidak cukup kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi.



Gambar 13. 12. Rotor mesin sinkron 4 kutub, jenis kutub menonjol.



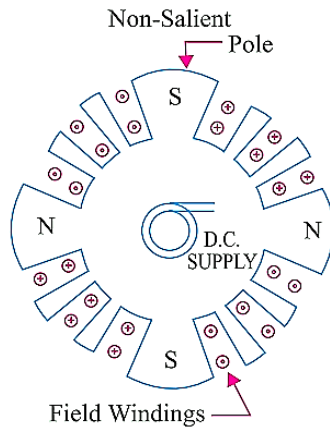
Gambar 13. 13. Mesin sinkron lengkap dengan eksiter.

#### **b. Jenis Kutub Silindris (*Non Salient Pole*)**

Pada jenis *non salient pole*, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Jenis rotor ini terbuat dari baja tempa halus yang berbentuk silinder yang mempunyai alur-alur terbuat di sisi luarnya. Kumaran-kumaran medan dipasang pada alur-alur di sisi luarnya dan terhubung seri yang diberi pasokan listrik oleh eksiter. Gambaran bentuk kutub silinder generator sinkron tampak seperti pada Gambar 13.14.

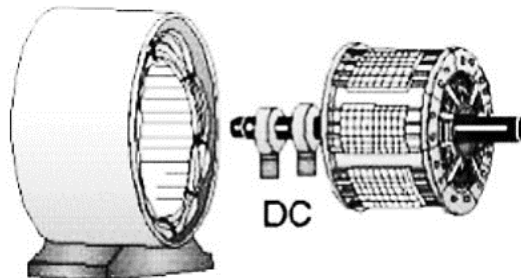
Rotor silinder umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar tinggi (1500 atau 3000 rpm) seperti yang terdapat pada pembangkit listrik tenaga uap. Rotor silinder baik digunakan pada kecepatan putar tinggi karena:

- Konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi.
- Distribusi di sekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol.

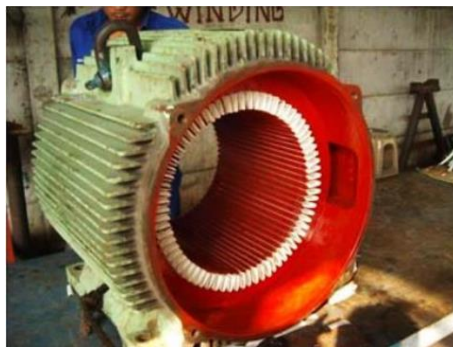


Gambar 13. 14. Rotor kutub silindris.

Generator ini mempunyai dua komponen utama yaitu stator (bagian yang diam) dan rotor (bagian yang bergerak). Bentuk gambaran sederhana konstruksi generator sinkron diperlihatkan pada Gambar 13.15 dan Gambar 13.16.



Gambar 13. 15. Bentuk sederhana konstruksi generator sinkron.



Gambar 13. 16. Bentuk konstruksi stator pada generator sinkron.

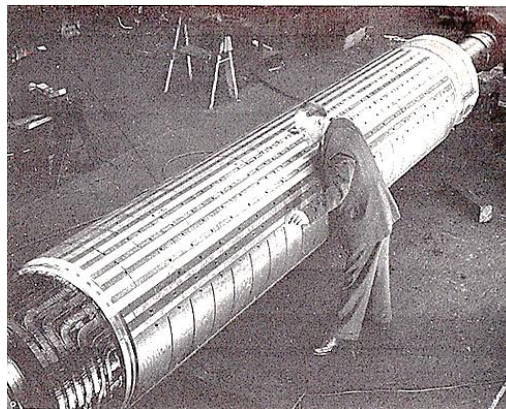
Dengan memperhatikan Gambar 13.15 dan Gambar 13.16, maka konstruksi stator ini terdiri dari:

1. **Kerangka atau gandar** dari besi tuang untuk menyangga inti jangkar.
2. **Inti jangkar** dari besi lunak / baja silikon.
3. **Alur/parit/slot** dan **gigi** tempat meletakkan kumparan (kumparan) bentuk alur ada yang terbuka, setengah tertutup dan tertutup.
4. **Kumparan jangkar** terbuat dari tembaga, yang diletakan pada alur.

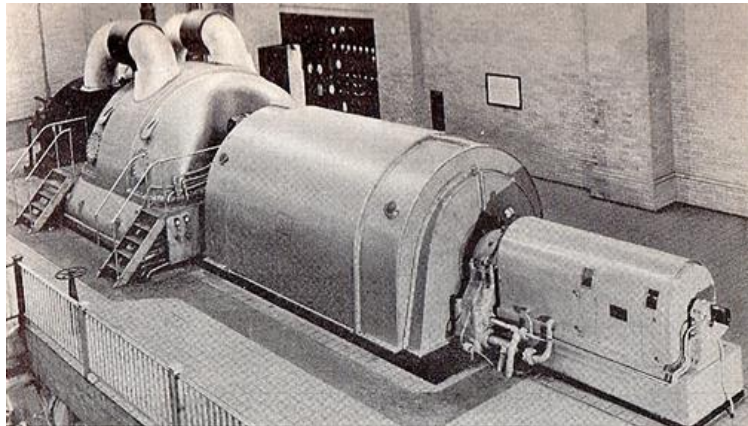
Pada generator sinkron yang berkapasitas besar, arus dc diberikan pada lilitan rotor untuk menghasilkan medan magnet rotor, sedangkan kumparan jangkar tempat terbangkitnya tegangan terletak di stator. Rotor ini diputar oleh *prime mover* (penggerak mula) agar terjadi perpotongan medan magnet yang berubah-ubah pada kumparan jangkar di stator. Dengan adanya perpotongan medan magnet yang berubah-ubah ini, maka timbul tegangan induksi pada kumparan jangkar generator.

Kumparan jangkar yang ada di stator biasanya disebut **kumparan stator** atau **kumparan jangkar**. Untuk generator 3-fasa biasanya kumparan dapat dirangkai dalam 2 jenis sebagai berikut.

1. **Kumparan satu lapis** (*single layer winding*), ada 2 bentuk, yaitu:
  - a. **Mata rantai** (*concertis or chain winding*)
  - b. **Gelombang** (*wave*)
2. **Kumparan dua lapis** (*double layer winding*), dengan 2 bentuk, yaitu:
  - a. **Jenis Gelombang** (*wave*)
  - b. **Jenis gelung** (*lap*)

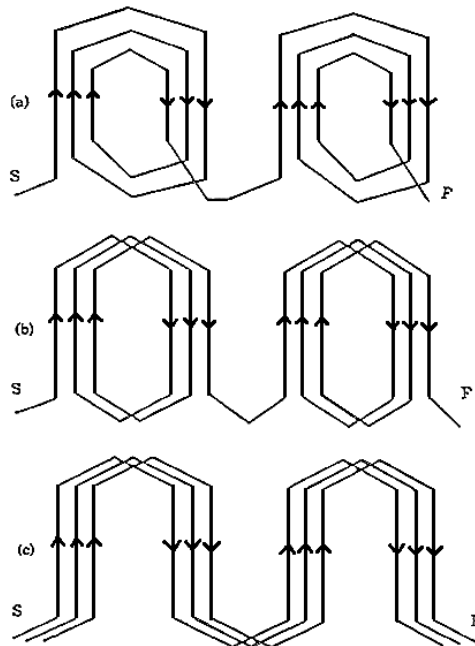


Gambar 13. 17. Rotor silinder dengan kumparan dan slot kumparan.

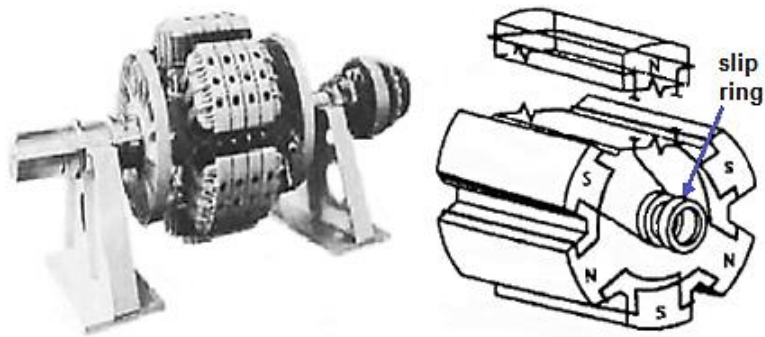


Gambar 13. 18. Generator sinkron jenis rotor silinder 3 fasa, 31.250 kVA, 14.440 volt, faktor daya 0,8, 3600 rpm, dengan turbin dan eksiter.

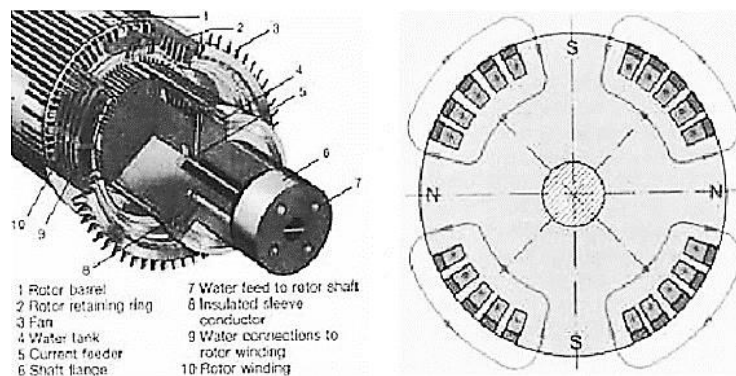
Gambaran bentuk lilitan stator dalam membentuk kutub magnet pada stator untuk menyesuaikan dengan kutub magnet rotor diperlihatkan Gambar 13.19.



Gambar 13. 19. Rangkaian kumparan jangkar di stator mesin sinkron. (a). Konsentris atau spiral. (b). Gelung (*lap*). (c). Gelombang (*wave*).



Gambar 13. 20. Bentuk konstruksi rotor *salient pole* (kutub menonjol) pada generator sinkron.



Gambar 13. 21. Bentuk konstruksi rotor kutub silindris pada generator sinkron.

Kutub magnet yang biasa digunakan pada rotor generator sinkron ada 2 jenis bentuk yaitu:

1. **Kutub sepatu atau menonjol (*salient pole*).**

Kutub menonjol terdiri dari inti kutub, badan kutub dan sepatu kutub. Kumparan medan dililitkan pada badan kutub. Pada sepatu kutub juga dipasang kumparan peredam (*damper winding*). Kumparan kutub dari tembaga, badan kutub dan sepatu kutub dari besi lunak.

2. **Kutub silindris (*non salient pole*).**

Kutup ini terdiri dari alur-alur dan gigi yang dipasang untuk menempatkan kumparan medan.

Pemilihan konstruksi rotor tergantung dari kecepatan putar penggerak mula, frekuensi dan rating daya generator. Pada **kutub sepatu (*salient*)**,

kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Rotor kutub sepatu ini biasanya digunakan untuk rotor dengan empat atau lebih kutub. Karena kutup rotornya banyak, maka biasanya rotor ini digerakkan dengan kecepatan yang rendah.

Pada **kutub silindris (*non-salient*)**, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor yang membentuk seperti silinder. Rotor silinder ini umumnya digunakan untuk rotor dua kutub dan empat kutub. Rotor ini biasanya digerakkan dengan kecepatan tinggi sehingga generator yang menggunakan kutub ini biasanya disebut juga dengan **turbo generator**. Generator dengan kecepatan 1500 rpm ke atas pada frekuensi 50 Hz dengan rating daya sekitar 10 MVA biasanya menggunakan rotor silinder.

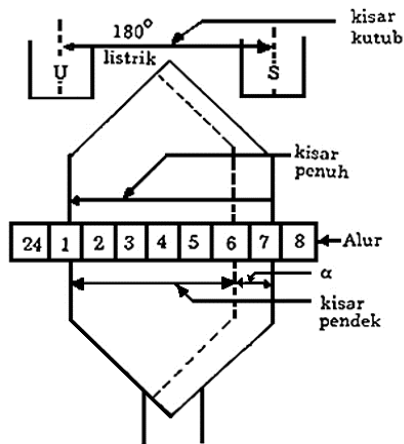
Sementara untuk daya dibawah 10 MVA dan kecepatan rendah maka digunakan rotor kutub sepatu. Generator-generator ini biasanya membentuk medan magnet dengan bantuan kumparan yang dililitkan pada rotornya, kemudian kumparan ini diberi sumber dc dengan sistem pengaturan yang baik sehingga besar arus yang melewati kumparan dapat diatur untuk mengatur kuat medan yang akan dihasilkan rotor.

Ada 2 cara pemasukan arus dc (sebagai arus medan) ke rangkaian medan rotor untuk membentuk medan magnet pada kumparan rotor, yaitu:

1. **Menyuplai daya dc ke rangkaian rotor dari sumber dc eksternal** (biasanya berupa baterai dari luar) dengan sarana *slip ring* dan sikat. Bila generator ini hanya menerima sumber dc dari luar untuk *start* awal saja, maka sumber dc sebagai penguat kumparan medan selanjutnya diambil dari keluaran generator itu sendiri (setelah sumber dari batere dilepas) dengan cara merubah keluaran ac generator ini menjadi dc (disearahkan sebelum dimasukkan ke kumparan medan pada rotor).
2. **Menyuplai daya dc dari sumber dc khusus** yang ditempelkan langsung pada batang rotor generator sinkron. Sumber dc ini biasanya dari generator dc yang ditempel pada rotor generator sinkron.

### 13.5 Faktor Kisar

Bila kisar atau gawang antara sisi lilitan yang satu dan sisi lilitan yang lain sama dengan jarak antara kutub yaitu  $180^0$  listrik maka lilitan tersebut dikatakan mempunyai gawang penuh atau kisar penuh, lihat Gambar 13.22.



Gambar 13. 22. Kisar atau gawang lilitan jangkar.

Bila jarak antara sisi lilitan yang satu dengan sisi lilitan yang lain kurang dari  $180^\circ$  listrik, lilitan tersebut dikatakan mempunyai kisar pendek (gawang pendek).

**Faktor kisar** (faktor gawang) atau  $k_c$  atau  $k_p$  adalah perbandingan antara kisar pendek terhadap kisar penuhnya atau dapat dihitung dengan persamaan:

$$k_c = k_p = \cos \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

### 13.6 Faktor Distribusi

Lilitan jangkar pada tiap fasa tidak dipusatkan hanya pada satu alur/slot tetapi didistribusikan pada beberapa alur/slot menyebabkan suatu faktor yang disebut **faktor distribusi** ( $k_d$ ), yang dapat dihitung dengan persamaan:

$$k_d = \frac{\sin m \frac{\beta}{2}}{m \sin \frac{\beta}{2}} \quad (3)$$

dengan,

$$\beta = \frac{180^\circ}{\text{Banyaknya alur per kutub}} = \frac{180^\circ}{n}$$

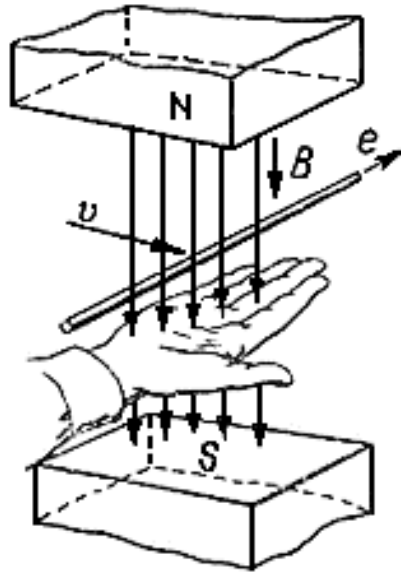
$m$  = banyaknya alur/fase/kutub.

### 13.7 Hukum Dasar Pembangkitan Tegangan Induksi

**Hukum Lenz** mengatakan bahwa, apabila sebuah penghantar dengan panjang,  $\ell$ , diputar pada kecepatan konstan,  $\vec{v}$ , di dalam medan magnet homogen dengan kerapatan fluks,  $\vec{B}$ , seperti diperlihatkan pada Gambar 13.23, maka pada penghantar tersebut, akan muncul tegangan induksi atau *electromotiveforce* (*EMF*),  $e$ , dengan arah sesuai kaidah tangan kanan yang besarnya ditentukan oleh persamaan (4) yaitu:

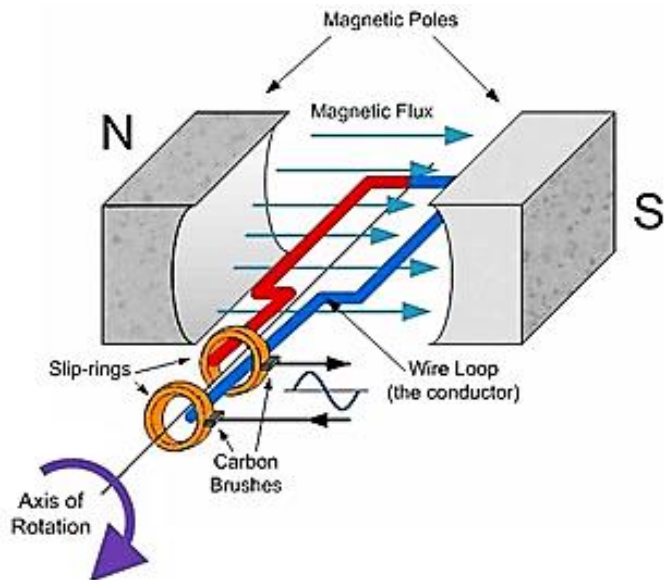
$$e_{\text{induksi}} = (\vec{v} \times \vec{B}) \ell \quad (4)$$

Medan magnet homogen ini bisa dihasilkan oleh kumparan penguat/eksiter yang dialiri arus searah atau oleh magnet tetap.



Gambar 13. 23. Kaidah tangan kanan.

Gambar 13.24 memperlihatkan suatu kumparan yang terdiri dari 1 lilitan ( $N = 1$ ) dengan panjang tertentu, diputar dengan kecepatan tertentu, didalam medan magnet yang dihasilkan oleh sepasang kutub  $N$  (utara) dan  $S$  (selatan) dengan kerapatan fluks tertentu, maka berdasarkan **hukum Lenz**, pada ujung kumparan tersebut yang masing-masing terhubung dengan cincin geser dan sikat, akan muncul tegangan induksi secara bolak-balik.



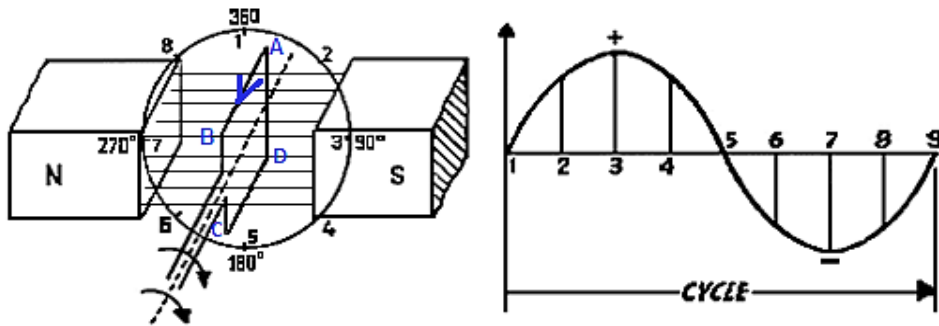
Gambar 13. 24. Kumparan jangkar pada rotor berputar di sekitar medan magnet yang dihasilkan stator.

### 13.8 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Generator dapat menghasilkan energi listrik karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet homogen terhadap kumparan jangkar pada generator (magnet yang bergerak dan kumparan jangkar diam, atau sebaliknya magnet diam sedangkan kumparan jangkar bergerak). Jadi, jika sebuah kumparan diputar pada kecepatan konstan pada medan magnet homogen, maka akan terinduksi tegangan sinusoidal pada kumparan tersebut.

Medan magnet homogen ini bisa dihasilkan oleh kumparan yang dialiri arus dc atau oleh magnet tetap. Contoh bentuk gambaran sederhana proses pembangkitan energi listrik pada generator sinkron dapat diperlihatkan seperti pada Gambar 13.24.

Pada Gambar 13.24 diperlihatkan contoh sederhana sebuah kumparan rotor berputar di sekitar medan magnet homogen yang dihasilkan stator, kemudian tegangan keluaran pada rotor diambil/dilewatkan melalui sepasang *slip ring* (cincin sikat) yang bisa dihubungkan ke beban. Proses terbentuknya gelombang ac yang dihasilkan pada keluaran rotor ini lebih jelasnya diperlihatkan pada Gambar 13.25.



Gambar 13. 25. Proses terbentuknya gelombang ac pada generator sinkron.

Dengan memperhatikan Gambar 13.24 dan Gambar 13.25, proses timbulnya *GGL* induksi pada generator dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Kumparan tembaga **BADC** berputar diantara magnet permanen **N – S**.
2. Kedua ujung kumparan dihubungkan dengan **slip ring** (cincin sikat).
3. *GGL* induksi akan menghasilkan arus (karena adanya beban pada generator) yang mengalir melalui sikat-sikat arang ke beban yang tersambung dengan generator.

Ketika kumparan **BADC** dari Gambar 13.25 diputar ke kanan, satu sisi kumparan dari kutub warna **merah** (kita anggap sisi kumparan warna **merah**) bergerak ke atas sedang sisi lainnya (kumparan dari sisi kutub warna biru, dianggap kumparan warna **biru**) bergerak ke bawah (perhatikan Gambar 13.25). Kumparan mengalami perubahan garis gaya magnet yang makin sedikit, sehingga pada kedua sisi kumparan akan dibangkitkan tegangan yang semakin sedikit pula. Bila alternator diberi beban, maka akan mengalir pula arus listrik yang semakin mengecil mengitari kumparan hingga mencapai posisi kumparan vertical dengan arus menjadi nol karena tegangan yang dibangkitkan juga nol (diperlihatkan pada Gambar 13.25). Pada posisi vertikal kumparan tidak mengalami perubahan garis gaya magnet sehingga tidak ada listrik yang mengalir pada kumparan (gelombang listrik ac beroda pada posisi no.1 pada Gambar 13.25).

Jika kumparan ini terus berputar hingga sisi merah bergerak ke kanan (sisi selatan, **S**) dan sisi biru bergerak ke kiri (sisi utara, **N**). Kumparan mengalami perubahan garis gaya magnet dari minimum ke maksimum

tetapi dengan arah yang berlawanan dari posisi sebelumnya (perhatikan bentuk gelombang pada Gambar 13.25), sehingga pada setiap sisi kumparan akan dibangkitkan tegangan maksimum (posisi kumparan horizontal dan gelombang berada pada titik no.3). Kumparan terus berputar hingga sisi merah bergerak terus ke bawah dan sisi biru bergerak ke atas. Saat ini kumparan mengalami perubahan garis gaya magnet maksimum ke minimum, sehingga tegangan yang dibangkitkan pada kumparan melemah hingga mendekati nol (pada posisi no.5).

Kemudian kumparan **BADC** terus berputar ke arah kutub utara (*N*) sehingga terjadi pembalikan arah gelombang (posisi no.6 dan 7). Bila kumparan terus berputar sehingga kumparan **BADC** kembali berada pada posisi di atas maka gelombang tegangan akan berubah menjadi pada posisi no.8 dan 9). Dari sini terlihat terbentuknya gelombang ac karena proses perputaran kumparan di dalam medan magnet yang terbentuk dalam kumparan jangkar ini adalah gelombang tegangan. Arus listrik akan mengalir saat terminal keluaran generator di beri beban seperti lampu atau beban yang lainnya.

Untuk generator berkapasitas kecil, medan magnet dapat diletakkan pada stator (disebut generator kutub eksternal / *external pole generator*) yang mana energi listrik dibangkitkan pada kumparan rotor. Jika cara ini digunakan untuk generator berdaya besar, maka hal ini dapat menimbulkan kerusakan pada slip ring dan karbon sikat.

Untuk mengatasi permasalahan ini, maka pada generator berkapasitas besar digunakan tipe generator dengan kutub internal (*internal pole generator*), yang mana medan magnet dibangkitkan oleh kutub rotor dan tegangan ac dibangkitkan pada rangkaian stator. **Tegangan yang dihasilkan akan sinusoidal jika rapat fluks magnet pada celah udara terdistribusi sinusoidal dan rotor diputar pada kecepatan konstan.** Bagian dari kumparan generator yang membangkitkan tegangan disebut **kumparan jangkar**, sedangkan bagian dari kumparan generator yang membangkitkan medan magnet disebut **kumparan medan**.

### 13.9 Frekuensi Generator Sinkron

Kecepatan perputaran generator sinkron akan mempengaruhi frekuensi listrik yang dihasilkan generator. Rotor generator sinkron terdiri atas rangkaian elektromagnet dengan suplai arus dc untuk membentuk

medan magnet pada rotor. Medan magnet rotor ini bergerak pada searah putaran rotor. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada rotor dengan frekuensi elektrik pada stator adalah:

$$f_e = \frac{N_r P}{120} \quad (5)$$

dimana:

$f_e$  = frekuensi listrik (Hz)

$N_r$  = kecepatan putar rotor (rpm)

$P$  = jumlah kutub magnet pada rotor

Dari rumus di atas terlihat bahwa frekuensi yang dihasilkan generator sinkron sangat dipengaruhi oleh kecepatan putaran rotor dan jumlah kutub magnet pada generator. Jika beban generator berubah, akan mempengaruhi kecepatan rotor generator.

Perubahan kecepatan rotor ini secara langsung akan mempengaruhi frekuensi yang dihasilkan generator. Kecepatan perputaran rotor pada generator sinkron akan sama dengan kecepatan medan magnet generator.

Oleh karena rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnetnya, maka generator ini disebut **generator sinkron** atau lebih dikenal dengan nama **Alternator**. Agar daya listrik dibangkitkan tetap pada frekuensi 50 Hz atau 60 Hz (sesuai standard suatu negara, di Indonesia adalah 50 Hz), maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub magnet yang telah ditentukan yang dapat dihitung melalui persamaan (5).

Sebagai contoh untuk membangkitkan frekuensi 50 Hz pada generator dua kutub, maka rotor harus berputar dengan kecepatan 3000 rpm, atau untuk membangkitkan frekuensi 50 Hz pada generator empat kutub, maka rotor harus berputar pada kecepatan 1500 rpm.

### 13.10 *GGL* Induksi pada Alternator

*GGL* induksi ( $E_a$ ) pada alternator akan terinduksi pada kumparan jangkar alternator (misalnya kumparan jangkar ditempatkan di stator) bila rotor di putar di sekitar stator (misalnya kumparan medan di rotor). Besarnya kuat medan pada rotor dapat diatur dengan cara mengatur arus medan ( $I_f$ ) yang diberikan pada rotor.

Besarnya *GGL* induksi internal ( $E_a$ ) yang dihasilkan kumparan jangkar yang ada di stator sebagai berikut:

$$E_a = 4,44 k_c k_d f \phi T \quad (\text{volt/fase}) \quad (6)$$

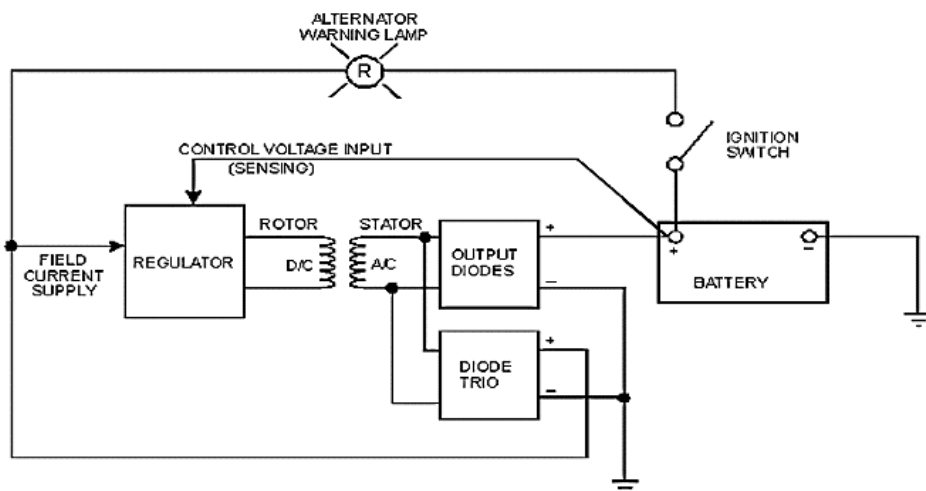
atau, disingkat menjadi:

$$E_a = c N_r \phi \quad (7)$$

dimana:

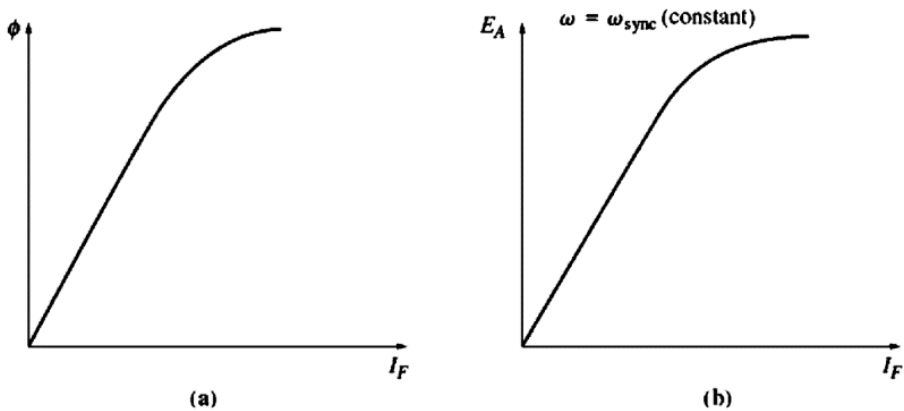
- $k_c$  = Faktor kisar
- $k_d$  = Faktor distribusi
- $f$  = Frekuensi dalam Hz atau cps
- $T$  = Banyaknya lilitan/fasa =  $\frac{1}{2} Z$
- $Z$  = Banyaknya sisi lilitan per fasa, satu lilitan ada dua sisi
- $c$  = Konstanta mesin
- $N_r$  = Kecepatan putaran rotor (rpm)
- $\phi$  = Fluks yang dihasilkan oleh kumparan medan (Weber)

Arus medan ( $I_f$ ) pada alternator biasanya diatur dengan menggunakan rangkaian kontrol agar diperoleh tegangan pembangkitan ( $E_a$ ) yang sesuai dengan kebutuhan. Bentuk gambaran pengaturan sederhana arus medan ( $I_f$ ) terhadap  $E_a$  yang dibangkitkan alternator diperlihatkan pada Gambar 13.26.



Gambar 13. 26. Diagram fungsi pengaturan arus medan pada alternator.

Apabila karakteristik pengaruh arus medan ( $I_f$ ) terhadap fluks dan  $GGL$  yang dihasilkan alternator digambarkan bila kondisi **kecepatan tetap**, maka keadaan ini dapat digambarkan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 13.27.



Gambar 13. 27. Karakteristik hubungan pengaruh arus medan terhadap fluks dan  $E_a$  pada alternator.

### 13.11 Analisis Prinsip Kerja Generator Sinkron

Adapun **prinsip kerja** dari suatu generator sinkron adalah

1. **Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi tertentu yang akan mensuplai arus searah terhadap kumparan medan.** Dengan adanya arus searah yang mengalir melalui kumparan medan maka akan menimbulkan **fluks yang besarnya terhadap waktu adalah tetap.**
2. **Penggerak mula (*prime mover*) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya.**

$$n = \frac{120 f}{P} \quad (8)$$

dimana:

$n$  = Kecepatan putar rotor (rpm)

$P$  = Jumlah kutub rotor

$f$  = frekuensi (Hz)

3. Perputaran rotor tersebut sekaligus akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Medan putar yang dihasilkan pada rotor akan diinduksikan pada kumparan jangkar sehingga pada kumparan jangkar yang terletak di stator akan menghasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah besarnya terhadap waktu. Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut, hal tersebut sesuai dengan persamaan:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d\phi_{maks} \sin \omega t}{dt}$$

$$e = -N \omega \phi_{maks} \cos \omega t$$

bila:  $\omega = 2\pi f$ , maka

$$e = -N(2\pi f) \phi_{maks} \cos \omega t$$

karena:

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

maka:

$$e = -N \left( 2\pi \frac{n P}{120} \right) \phi_{maks} \cos \omega t$$

agar  $e$  maksimum, maka  $\cos \omega t = 1$ , sehingga,

$$E_{maks} = N \left( 2 \times 3,14 \times \frac{n P}{120} \right) \phi_{maks}$$

Nilai  $rms$  atau nilai efektif  $e$  adalah:

$$E_{eff} = \frac{E_{maks}}{\sqrt{2}} = \frac{N \left( 2 \times 3,14 \times \frac{n P}{120} \right) \phi_{maks}}{\sqrt{2}} = \frac{4,44 N P n \phi_{maks}}{120}$$

bila:

$$c = \frac{4,44 N P}{120}$$

maka,

$$E_{eff} = c n \phi_{maks} \quad (9)$$

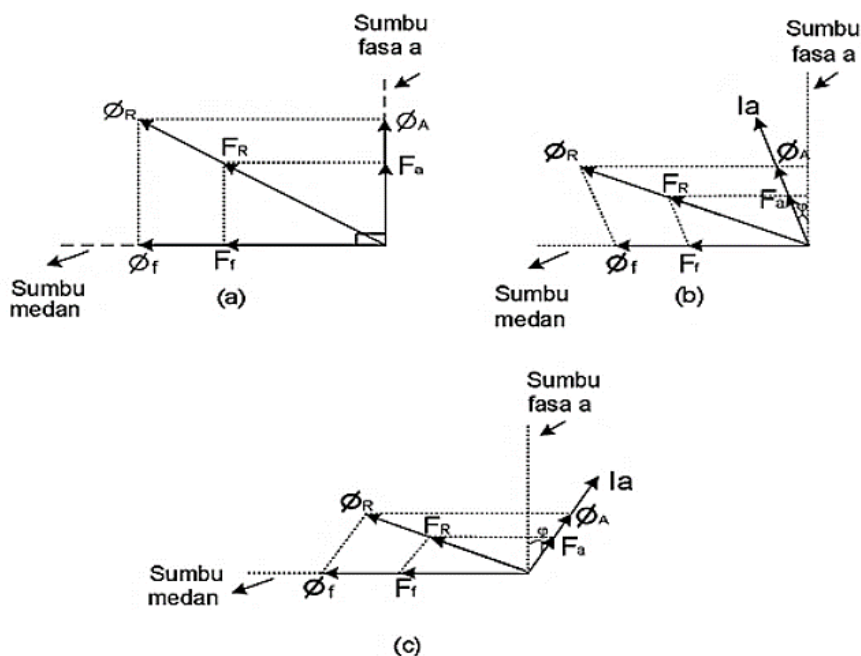
dimana:

$E_{eff}$	: ggl induksi (volt)	$n$	: putaran
$N$	: jumlah lilitan	$f$	: frekuensi (Hz)
$c$	: konstanta	$\phi_{maks}$	: Fluks magnetik (Wb)
$P$	: jumlah kutub		

Untuk generator sinkron tiga fasa, digunakan tiga kumparan jangkar yang ditempatkan di stator yang disusun dalam bentuk tertentu, sehingga susunan kumparan jangkar yang sedemikian akan **membangkitkan tegangan induksi pada ketiga kumparan jangkar yang besarnya sama** tapi berbeda fasa  $120^0$  satu sama lain. Setelah itu ketiga terminal kumparan jangkar siap dioperasikan untuk menghasilkan energi listrik.

### 13.11.1 Reaksi Jangkar Generator Sinkron

Saat generator sinkron bekerja pada beban nol tidak ada arus yang mengalir melalui kumparan jangkar (stator), sehingga yang ada pada celah udara hanya **fluksi arus medan rotor**. Namun jika generator sinkron diberi beban, **arus jangkar  $I_a$  akan mengalir dan membentuk fluksi jangkar**. Fluksi jangkar ini kemudian mempengaruhi fluksi arus medan dan akhirnya menyebabkan berubahnya harga tegangan terminal generator sinkron  $V_t$ . Reaksi ini kemudian dikenal sebagai **reaksi jangkar** seperti pada Gambar 13.28 berikut ini.



Gambar 13. 28. Model reaksi jangkar, (a)  $I_a$  sefasa dengan  $V_t$ , (b)  $I_a$  terdahulu dari  $V_t$ , dan (c)  $I_a$  terbelakang dari  $V_t$ .

dimana:

$I_a$  = arus jangkar

$\phi_A$  = fluks jangkar

$\phi_F$  = fluks medan penguatan

$\phi_R$  = fluks resultan =  $\phi_F + \phi_A$

$\varphi$  = beda sudut fasa antara arus jangkar  $I_a$  dengan tegangan generator  $V_t$

$F_A$  = *mmf* jangkar

$F_F$  = *mmf* medan penguatan

$F_R$  = *mmf* resultan =  $F_F + F_A$

Keterangan gambar:

- 1) **Arus jangkar  $I_a$  sefasa dengan  $V_t$ .** Jenis beban **resistif** dimana  $\phi_A$  tegak lurus terhadap  $\phi_F$ .
- 2) **Arus jangkar  $I_a$  terdahulu  $\varphi$  dari  $V_t$ .** Jenis beban **kapasitif** dimana  $\phi_A$  memperkuat  $\phi_F$ , sehingga terjadi pengaruh pemagnetan.
- 3) **Arus jangkar  $I_a$  terbelakang dari  $V_t$ .** Jenis beban **induktif** dimana  $\phi_A$  memperlemah  $\phi_F$ , terjadi pengaruh pendemagnetan.

Pengaruh yang ditimbulkannya dapat berupa **distorsi, penguatan** (magnetisasi), maupun **pelemahan** (*demagnetizing*) **fluksi arus medan pada celah udara.**

Perbedaan pengaruh yang ditimbulkan fluksi jangkar tergantung kepada beban dan faktor daya beban, yaitu:

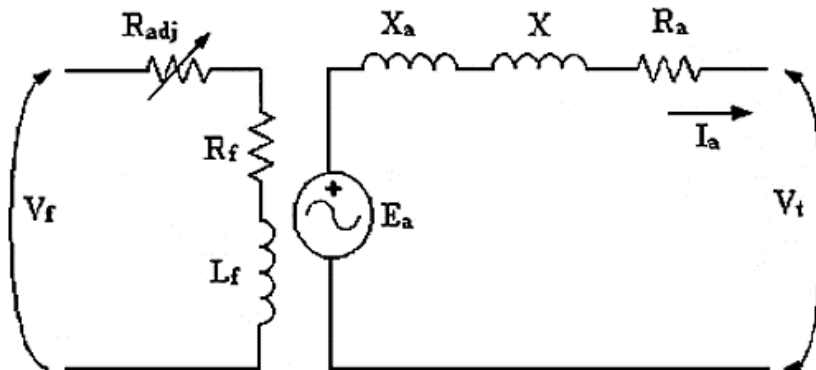
- a. **Untuk beban resistif ( $\cos \phi = 1$ ).** Pengaruh fluksi jangkar terhadap fluksi medan hanya sebatas mendistorsinya saja tanpa pengaruh kekuatannya (*cross magnetizing*).
- b. **Untuk beban induktif murni ( $\cos \phi = 0$  lag).** Arus akan tertinggal  $90^\circ$  dari tegangan. Fluksi yang dihasilkan oleh arus jangkar akan melawan fluksi arus medan. Dengan kata lain reaksi jangkar akan *demagnetizing* artinya pengaruh reaksi jangkar akan melemahkan fluksi arus medan.
- c. **Untuk beban kapasitif murni ( $\cos \phi = 0$  lead).** Arus akan mendahului tegangan sebesar  $90^\circ$ . Fluksi yang dihasilkan arus jangkar akan searah dengan fluksi arus medan sehingga reaksi jangkar yang terjadi

*magnetizing* artinya pengaruh reaksi jangkar akan menguatkan fluksi arus medan.

- d. **Untuk beban tidak murni** (induktif/kapasitif). Pengaruh reaksi jangkar akan menjadi sebagian *magnetizing* dan sebagian *demagnetizing*. Saat beban adalah **kapasitif**, maka reaksi jangkar akan sebagian distorsi dan sebagian *magnetizing*. Sementara itu saat beban adalah **induktif**, maka reaksi jangkar akan sebagian distorsi dan sebagian *demagnetizing*. Namun pada prakteknya beban umumnya adalah induktif.

### 13.11.2 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

Stator merupakan grup kumparan jangkar yang terbuat dari tembaga. Kumparan-kumparan ini diletakkan pada alur-alur (slot), dimana suatu kumparan konduktor akan mengandung tahanan ( $R$ ) dan induktansi ( $L$ ), maka kumparan stator akan mengandung tahanan stator ( $R_a$ ) dan induktansi sendiri ( $L_f$ ). Akibat adanya pengaruh reaktansi reaksi jangkar  $X_a$  dan reaktansi bocor jangkar  $X$  maka rangkaian ekuivalen suatu generator sinkron dapat dibuat seperti Gambar 13.29.



Gambar 13. 29. Rangkaian ekuivalen generator sinkron.

Dengan melihat Gambar 13.29 maka dapat ditulis persamaan tegangan generator sinkron sebagai berikut:

$$E_a = V_t + I_a j(X_a + X) + I_a R_a \quad (10)$$

Dan persamaan tegangan terminal generator sinkron dapat ditulis:

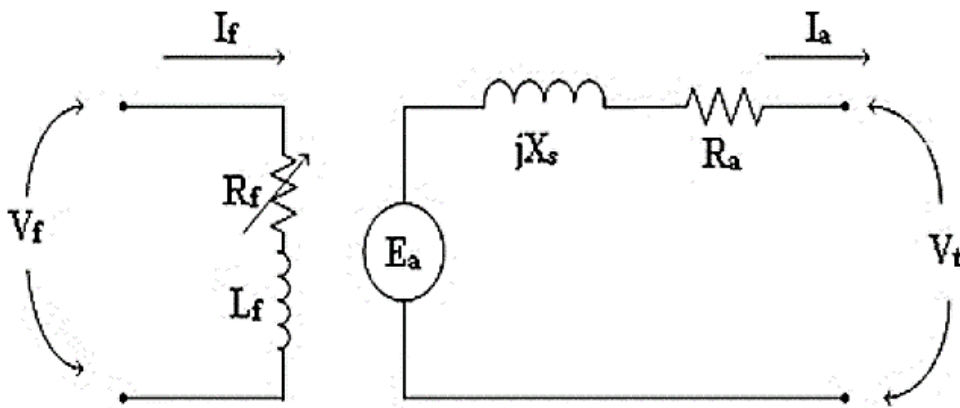
$$V_t = E_a - I_a j(X_a + X) - I_a R_a \quad (11)$$

Dengan menyatakan reaktansi reaksi jangkar dan reaktansi fluks bocor sebagai reaktansi sinkron, atau  $X_s = X_a + X$  dapat dilihat pada Gambar 13.30 maka persamaan menjadi:

$$V_t = E_a - I_a jX_s - I_a R_a \text{ (volt)} \quad (12)$$

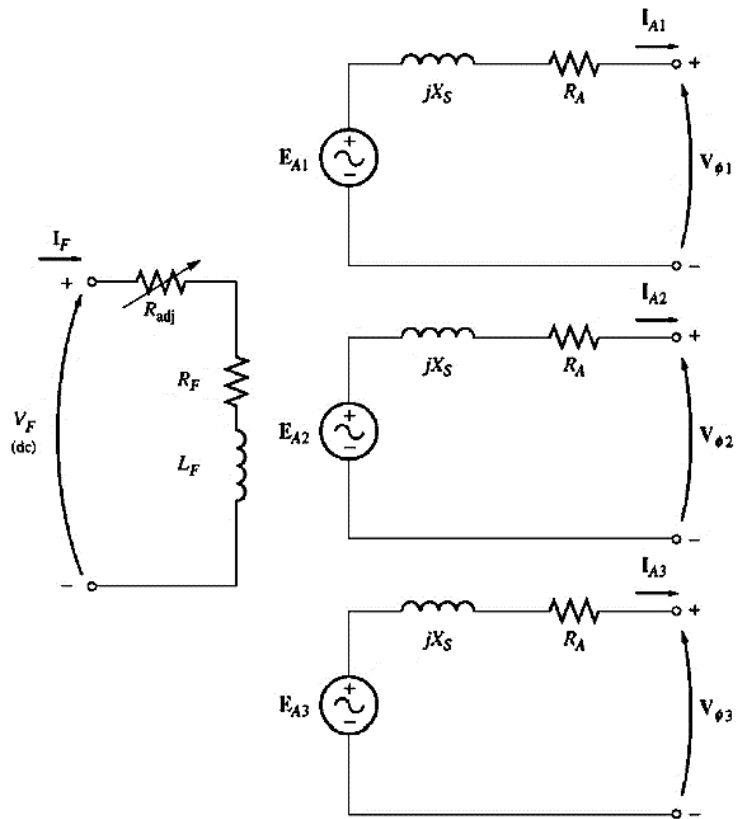
dimana:

- $V_f$  = Tegangan eksitasi (volt)
- $R_f$  = Tahanan kumparan medan (ohm)
- $L_f$  = Induktansi kumparan medan (henry)
- $R_{adj}$  = Tahanan variabel (ohm)
- $E_a$  = ggl yang dibangkitkan generator sinkron (volt)
- $V_t$  = Tegangan terminal generator sinkron (volt)
- $X_a$  = Reaktansi armatur (ohm)
- $X$  = Reaktansi bocor (ohm)
- $X_s$  = Reaktansi sinkron (ohm)
- $I_a$  = Arus jangkar (Ampere)



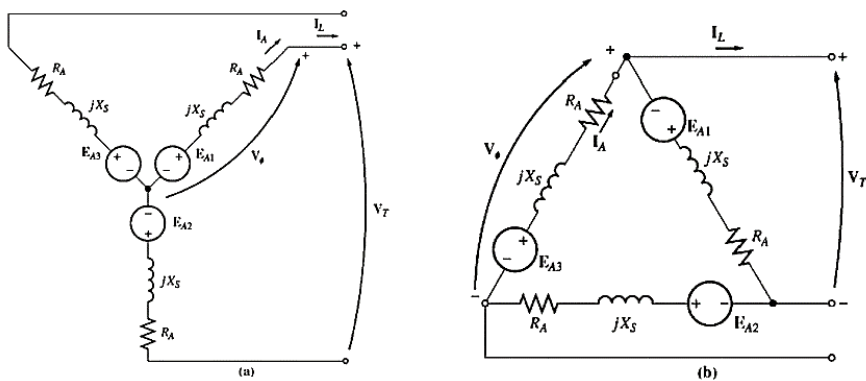
Gambar 13. 30. Penyederhanaan rangkaian generator sinkron.

Karena tegangan yang dibangkitkan oleh generator sinkron adalah tegangan bolak-balik tiga fasa maka gambar yang menunjukkan hubungan tegangan induksi perfasa dengan tegangan terminal generator seperti ditunjukkan pada Gambar 13.31.



Gambar 13. 31. Rangkaian ekivalen generator sinkron tiga fasa.

Sementara itu, rangkaian ekivalen generator sinkron tiga fasa untuk tiap jenis hubungan ditunjukkan oleh Gambar 13.32 berikut ini.



Gambar 13. 32. Rangkaian ekivalen kumpulan stator tiga fasa generator sinkron (a). hubungan – Y dan (b). hubungan – Δ.

### 13.11.3 Efek Perubahan Beban Pada Generator Yang Beroperasi Sendiri

Bertambahnya beban yang dilayani generator identik dengan bertambahnya daya nyata atau daya reaktif yang mengalir dari generator. Maka penambahan beban akan menambah arus saluran yang mengalir dari generator, penambahan arus saluran ini akan mempengaruhi nilai tegangan terminal  $V_T$ , hal yang berpengaruh terutama oleh faktor daya beban, seperti pada Gambar 13.33, diperlihatkan diagram fasor untuk penambahan beban dengan faktor daya *lagging*, faktor daya *leading*, dan faktor daya *satu*.

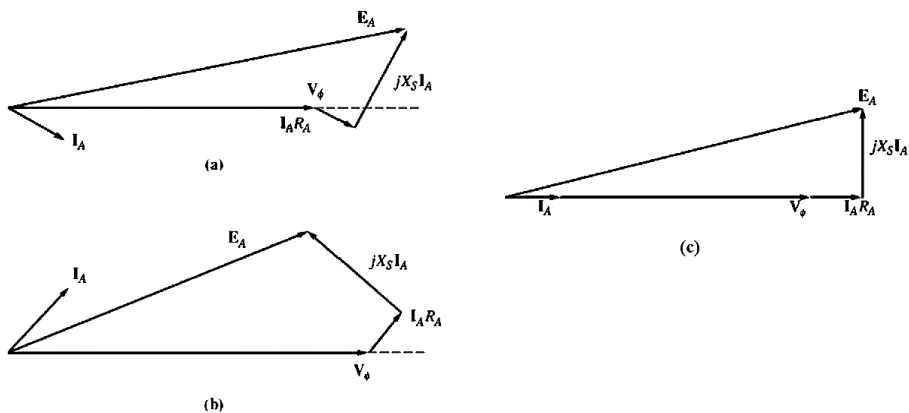
Terlihat bahwa **untuk beban induktif, penambahan beban akan mengurangi tegangan terminal akan mengecil**. Begitu juga jika beban resistif ditambahkan maka tegangan terminal juga akan mengecil. Jika beban kapasitif ditambahkan, maka tegangan terminal cenderung membesar.

Pada **kondisi normal, untuk menjaga tegangan terminal agar tetap konstan** meskipun **beban berubah** maka dapat dilakukan dengan mengatur nilai  $E_a$ , karena  $E_a = K \phi \omega$ , maka  $E_a$  **dapat dijaga konstan** dengan **mengatur nilai fluksi**. Nilai fluksi tentu dipengaruhi oleh arus medan  $I_f$ . Bertambahnya  $I_f$  akan menambah fluksi, begitu juga sebaliknya. Beban yang dilayani generator selalu berubah-ubah.

Selain besarnya juga faktor dayanya, ini menuntut penentuan arus eksitasi yang sesuai dengan faktor dayanya untuk menghasilkan tegangan terminal generator yang stabil. Gambar 13.34 menunjukkan contoh hubungan antara arus jangkar  $I_a$  dan arus medan  $I_f$  untuk tiga jenis faktor daya, dalam hal ini generator yang dipakai memiliki tegangan kerja 24 kV dan daya 400 MVA. Terlihat untuk arus beban yang sama, maka arus medan yang harus diberikan berbeda-beda tergantung pada faktor daya beban.

Dapat disimpulkan untuk generator yang bekerja sendiri:

1. Daya yang disuplai generator sesuai kebutuhan beban.
2. Pengaturan governor pada generator akan mempengaruhi frekuensi daya yang dihasilkan.
3. Pengaturan arus medan akan mempengaruhi nilai tegangan terminal.



Gambar 13. 33. Diagram fasor generator sinkron: (a). faktor daya *lagging*, (b). faktor daya *leading*, dan (c). faktor daya *satu*.

#### 13.11.4 Faktor Daya

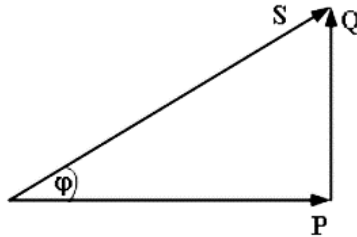
Dalam sistem listrik ac atau arus bolak-balik ada tiga jenis daya yang dikenal, khususnya untuk beban yang memiliki impedansi ( $Z$ ), yaitu:

- **Daya semu ( $S$ )**, VA (volt ampere).
- **Daya aktif ( $P$ )**, watt.
- **Daya reaktif ( $Q$ )**, VAR (volt ampere reaktif).

Untuk rangkaian listrik ac, bentuk gelombang tegangan dan arus sinusoidal, besarnya daya setiap saat tidak sama. Maka daya yang merupakan daya rata-rata diukur dengan satuan Watt, daya ini membentuk energi aktif persatuan waktu dan dapat diukur dengan kwh meter dan juga merupakan daya nyata atau daya aktif (daya poros, daya yang sebenarnya) yang digunakan oleh beban untuk melakukan tugas tertentu. Sedangkan daya semu dinyatakan dengan satuan Volt-Ampere (disingkat VA), menyatakan kapasitas peralatan listrik, seperti yang tertera pada peralatan generator dan transformator.

Pada suatu instalasi, khususnya di pabrik/industri juga terdapat beban tertentu seperti motor listrik, yang memerlukan bentuk lain dari daya, yaitu daya reaktif (VAR) untuk membuat medan magnet atau dengan kata lain daya reaktif adalah daya yang terpakai sebagai energi pembangkitan fluks magnetik sehingga timbul magnetisasi dan daya ini dikembalikan ke sistem

karena efek induksi elektromagnetik itu sendiri, sehingga daya ini sebenarnya merupakan beban (kebutuhan) pada suatu sistem tenaga listrik.



Gambar 13. 34. Segitiga daya.

Faktor daya atau faktor kerja adalah perbandingan antara daya aktif (watt) dengan daya semu/daya total (VA), atau cosinus sudut antara daya aktif dan daya semu/daya total (lihat Gambar 13.34).

Daya reaktif yang tinggi akan meningkatkan sudut dan sebagai hasilnya faktor daya akan menjadi lebih rendah. Faktor daya selalu lebih kecil atau sama dengan satu.

### 13.12 Generator Serempak Berbeban

Jika generator serempak belum berbeban maka  $EMF$  ( $E$ ) yang dibangkitkan pada kumparan jangkar yang ada di stator sama dengan tegangan terminalnya ( $V$ ).

Waktu generator berbeban maka  $EMF$  ( $E$ ) tersebut di atas tidak sama dengan tegangan terminalnya ( $V$ ), tegangan terminal akan bervariasi karena:

1. **Jatuh tegangan** (*voltage drop*) karena resistansi jangkar ( $R_a$ ) sebesar  $IR_a$ .
2. **Jatuh tegangan karena reaktansi bocor** ( $X_L$ ) dari jangkar sebesar  $(IX_L)$ .
3. **Jatuh tegangan karena reaksi jangkar** sebesar  $(IX_a)$ .

Reaksi jangkar disebabkan oleh arus beban ( $I$ ) yang mengalir pada kumparan jangkar, arus tersebut akan menimbulkan medan yang melawan medan utama sehingga seolah-olah jangkar mempunyai reaktansi sebesar  $X_a$ .

Reaktansi bocor ( $X_L$ ) dan reaktansi karena reaksi jangkar ( $X_a$ ) akan menimbulkan reaktansi sinkron sebesar ( $X_s$ ) yang mengikuti persamaan berikut:

$$X_s = X_L + X_a \quad (13)$$

Tegangan pada waktu generator berbeban secara vektor akan mengikuti persamaan:

$$\bar{E} = \bar{V} + \overline{I(R_a + jX_s)} \quad (14)$$

dengan,

- $E$  = EMF jangkar dalam volt.
- $V$  = Tegangan terminal, dalam volt.
- $I$  = Arus beban dalam Ampere.
- $R_a$  = Resistansi kumparan jangkar dalam ohm.
- $X_s$  =  $X_L + X_a$  = Reaktansi sinkron, dalam ohm.

### 13.13 Diagram Vektor Generator Serempak Berbeban

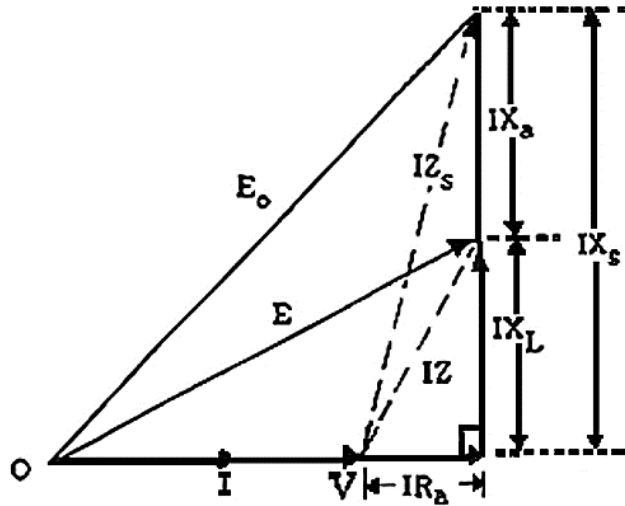
Diagram vektor ini mempunyai besaran-besaran sebagai berikut:

- $E_o$  = EMF (tegangan induksi) pada waktu beban nol dari jangkar.
- $E$  = EMF waktu jangkar berbeban atau setelah ada reaksi jangkar.  $E$  secara vektor kurang dari  $E_o$  karena jatuh tegangan sebesar  $IX_a$ . Ada kalanya  $E$  ini ditulis sebagai  $E_a$ .
- $V$  = Tegangan terminal, secara vektor kurang dari  $E_o$  karena jatuh tegangan sebesar  $IZ_s$  atau kurang dari  $E$  karena **jatuh tegangan** sebesar  $IZ$  dengan  $Z = \sqrt{R_a^2 + X_L^2}$
- $I$  = Arus jangkar per fasa.
- $\phi$  = Sudut faktor kerja (sudut faktor daya atau sudut faktor beban).

Diagram vektor (diagram fasor) dari generator serempak yang berbeban ada 3 macam.

#### 13.13.1 Diagram vektor untuk beban non induktif

Dalam hal ini vektor tegangan terminal dan vektor arus sefasa atau faktor kerja **satu** (*unity*), lihat Gambar 13.35 berikut ini.



Gambar 13. 35. Diagram vektor dari generator serempak berbeban non induktif.

Dari diagram vektor pada Gambar 13.35 diatas, dapat dituliskan persamaan tegangannya sebagai berikut:

$$\bar{E}_o = \bar{V} + \overline{I(R_a + jX_s)} \quad (15)$$

atau,

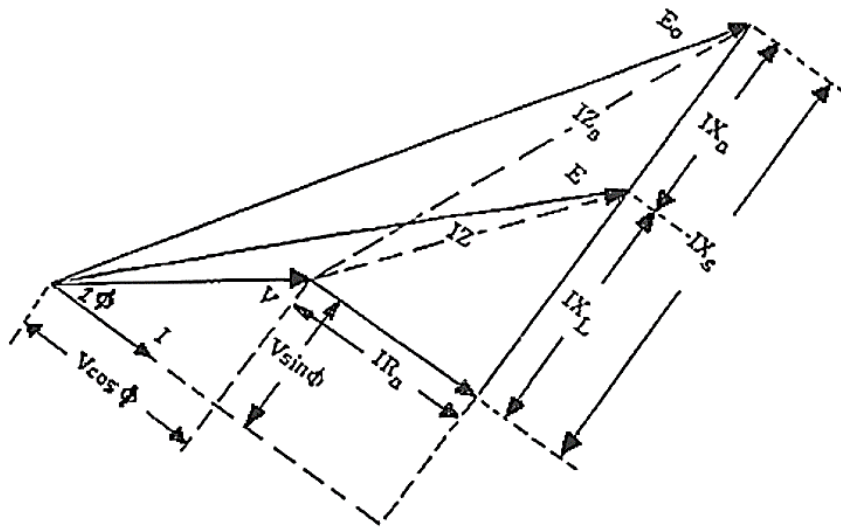
$$E_o = \sqrt{(V + IR_a)^2 + (IX_s)^2} \quad (16)$$

### 13.13.2 Diagram vektor untuk beban induktif

Bila generator serempak berbeban, dimana bebannya induktif maka vektor arus terbelakang atau mengikut (*lagging*) terhadap vektor tegangan, lihat pada Gambar 13.36 berikut ini.

Dari diagram vektor pada Gambar 13.36 diatas, dapat dituliskan persamaan tegangannya sebagai berikut:

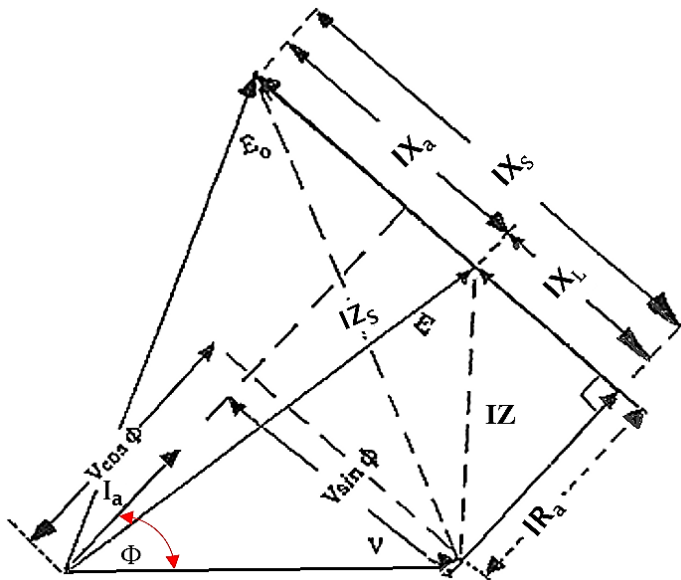
$$E_o = \sqrt{(V \cos \phi + IR_a)^2 + (V \sin \phi + IX_s)^2} \quad (17)$$



Gambar 13. 36. Diagram vektor dari generator serempak berbeban induktif.

### 13.13.3 Diagram vektor untuk beban kapasitif

Bila generator serempak bekerja dengan beban kapasitif dimana vektor arus mendahului (*leading*) terhadap vektor tegangan, lihat Gambar 13.37 berikut ini.



Gambar 13. 37. Diagram vektor dari generator sinkron yang berbeban kapasitif.

Dari gambar diagram vektor tersebut, dapat dituliskan persamaan tegangannya sebagai berikut:

$$E_o = \sqrt{(V\cos\phi + IR_a)^2 + (IX_s - V\sin\phi)^2} \quad (18)$$

### Contoh Soal 1.

Suatu generator serempak 3 fasa, hubungan Y melayani beban 10 MW, pada faktor daya 0,85 mengikuti dan tegangan terminal 11 kV. Jika resistansi jangkar 0,1 ohm per fasa dan reaktansi sinkron 0,66 ohm/fasa. Hitunglah *EMF* yang dibangkitkan antara fasa (saluran).

### Penyelesaian:

$$P_B = \sqrt{3} \times V_{L-L} \times I \times \cos \phi \rightarrow I = \frac{P_B}{\sqrt{3} \times V_{L-L} \times \cos \phi}$$

$$I = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 11.000 \times 0,85} = 618 \text{ Ampere}$$

$$IR_a = 618 \times 0,1 = 61,8 \text{ volt}$$

$$IX_a = 618 \times 0,66 = 408 \text{ volt}$$

$$\text{Tegangan terminal/fasa} = \frac{11.000}{\sqrt{3}} = 6350 \text{ volt}$$

$$\cos \phi = 0,85 \rightarrow \phi = \cos^{-1}(0,85) = 21,8^\circ$$

$$\sin \phi = \sin 21,8^\circ = 0,527$$

Diagram vektornya lihat Gambar 13.36, akan didapatkan:

$$E_o = \sqrt{(V\cos\phi + IR_a)^2 + (V\sin\phi + IX_s)^2}$$

$$E_o = \sqrt{(6350 \times 0,85 + 61,8)^2 + (6350 \times 0,527 + 408)^2}$$

$$E_o = 6625 \text{ volt per fasa, atau}$$

$$E_o = \sqrt{3} \times 6625 = 11480 \text{ volt antara fasa}$$

### 13.14 Regulasi Tegangan Generator Serempak

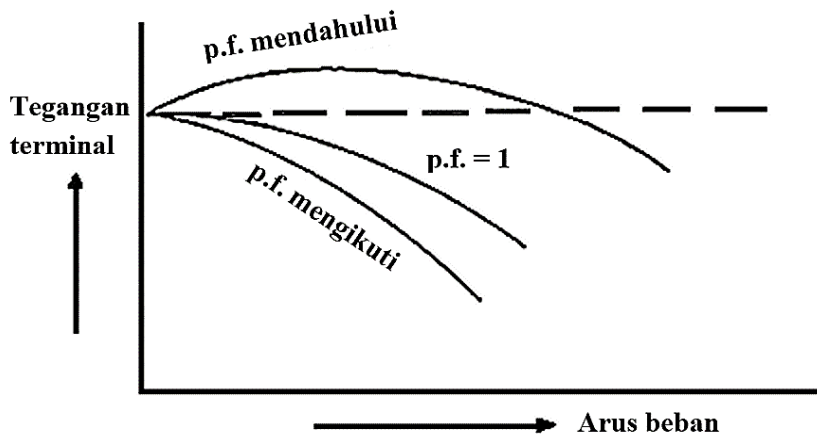
Perubahan beban pada generator serempak akan menyebabkan perubahan tegangan di terminalnya, besarnya perubahan tersebut tidak hanya tergantung dari perubahan beban tapi juga tergantung pada faktor beban (*faktor kerja = faktor daya*).

Hal tersebut menimbulkan istilah regulasi tegangan yang diartikan sebagai kenaikan tegangan bila beban penuh dilepas dimana eksitasi atau penguatannya serta kecepatannya tetap, dibagi dengan tegangan terminal, atau dirumuskan sebagai berikut:

$$\% \text{Regulasi} = \frac{E_o - V}{V} \times 100\% \quad (19)$$

dengan catatan:

1.  $E_o - V$  bukan pengurangan vektor.
2. Untuk beban dengan faktor daya mendahului atau beban kapasitif, regulasi negatif karena tegangan terminal ( $V$ ) terkadang lebih tinggi dari  $E_o$ .
3. Persamaan regulasi tegangan tersebut untuk generator serempak yang mempunyai kapasitas kecil, akan tetapi untuk generator serempak dengan kapasitas besar tidak dibahas disini.
4. Karakteristik tegangan generator serempak sehubungan dengan regulasi tegangan tersebut dapat digambarkan berikut ini.



Gambar 13. 38. Karakteristik tegangan terminal dari generator serempak versus arus beban dengan berbagai faktor beban.

### Contoh Soal 2.

Suatu generator serempak 3 fasa, 50 kVA, 440 volt, 50 Hz, hubungan Y dengan resistansi jangkar yang efektif 0,25 ohm/fasa, reaktansi sinkron 3,2

ohm/fasa dan reaktansi bocor 0,5 ohm/fasa. Hitunglah untuk beban penuh dengan faktor daya ( $pf$ ) = 1.

- $EMF$  waktu berbeban ( $E_a$ ).
- $EMF$  waktu beban nol ( $E_o$ ).
- % regulasi pada waktu beban penuh.

**Penyelesaian:**

Dari diagram vektor Gambar 13.35, diperoleh bahwa:

- $EMF$  ( $E_a$ ) adalah jumlah vektor dari:
  - Tegangan terminal  $V$ .
  - $IR_a$  dan
  - $IX_L$

$$V = \frac{440}{\sqrt{3}} = 254 \text{ volt}$$

$$\text{Arus beban penuh: } I = \frac{50.000}{\sqrt{3} \times 440} = 65,6 \text{ Ampere}$$

$$IR_a = 65,6 \times 0,25 = 16,4 \text{ volt}$$

$$IX_L = 65,6 \times 0,5 = 32,8 \text{ volt}$$

$$E_a = \sqrt{(V + IR_a)^2 + (IX_s)^2}$$

$$E_a = \sqrt{(254 + 16,4)^2 + (32,8)^2} = 272 \text{ volt/fasa}$$

- $EMF$  ( $E_o$ ) adalah jumlah vektor dari  $V$ ,  $IR_a$  dan  $IX_s$ .

$$E_o = \sqrt{(V + IR_a)^2 + (IX_s)^2}$$

$$E_o = \sqrt{(254 + 16,4)^2 + (65,6 \times 3,2)^2} = 342 \text{ volt/fasa}$$

$$E_o = 3 \times 342 = 592 \text{ volt antara fasa.}$$

$$c. \text{ \% Regulasi} = \frac{E_o - V}{V} \times 100\% = \frac{342 - 254}{254} \times 100\% = 34,65\%.$$

**13.15 Efisiensi**

**Efisiensi** atau **daya guna** atau **rendemen** dari generator serempak dapat dihitung seperti pada generator arus searah yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Efisiensi = \frac{\text{Daya output } (P_o)}{\text{Daya input } (P_i)} \times 100\% \quad (20)$$

atau,

$$Efisiensi = \frac{\left( \text{Daya input } (P_i) \right) - \left( \text{Rugi total} \right)}{\left( \text{Daya input } (P_i) \right)} \times 100\% \quad (21)$$

atau,

$$Efisiensi = \left( 1 - \frac{\left( \text{Rugi total} \right)}{\left( \text{Daya input } (P_i) \right)} \right) \times 100\% \quad (22)$$

atau,

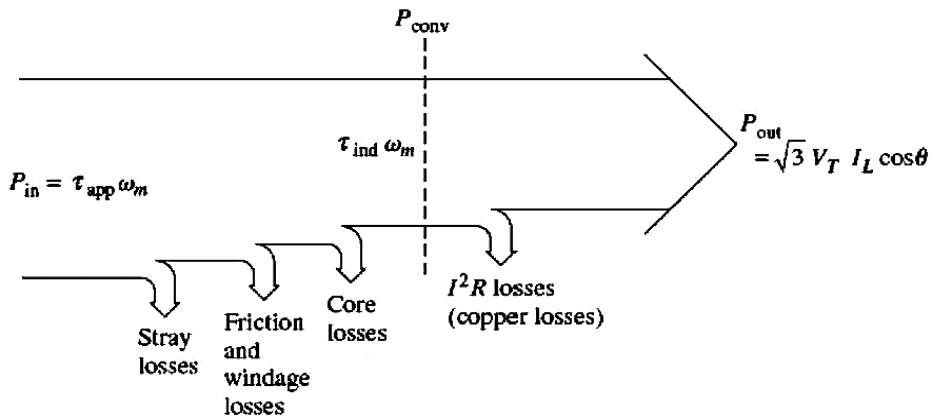
$$Efisiensi = \left( 1 - \frac{\left( \text{Rugi total} \right)}{\left( P_o \right) + \left( \text{Rugi total} \right)} \right) \times 100\% \quad (23)$$

atau,

$$Efisiensi = \frac{\text{Daya output } (P_o)}{\left( P_o \right) + \left( \text{Rugi total} \right)} \times 100\% \quad (24)$$

Pada waktu generator serempak berbeban, **rugi-rugi** yang terjadi terdiri dari:

1. **Rugi-rugi rotasi** yang terdiri dari:
  - a. Rugi angin dan geseran.
  - b. Rugi geseran sikat pada cincin geser.
  - c. Rugi ventilasi pada waktu pendinginan mesin.
  - d. Rugi histeresis dan arus pusar di stator.
2. **Rugi-rugi listrik** yang terdiri dari:
  - a. Rugi pada kumparan medan.
  - b. Rugi pada kumparan jangkar.
  - c. Rugi pada kontak sikat.
3. **Rugi eksitasi** yang dipakai untuk penguatan.
4. **Rugi beban sasar** (*stray load loss*).



Gambar 13. 39. Diagram aliran daya generator sinkron.

### Contoh Soal 3.

Suatu generator serempak  $3\phi$ , 2000 kVA, 2300 volt bekerja pada beban penuh dengan faktor daya 0,85. Resistansi arus searah dari kumparan jangkar pada  $75^{\circ}\text{C}$  antara fasa 0,08 ohm. Medan menarik arus 72 Ampere pada tegangan 125 volt dari peralatan penguatan. Rugi angin dan geseran 18,8 kW, rugi inti 37,6 kW, rugi beban sasar 2,2 kW. Hitunglah efisiensi dengan mengasumsikan resistansi jangkar yang efektif =  $1,3 \times$  resistansi searah.

### Penyelesaian:

$$\text{Daya output } (P_o) = S \cos \theta = 2000 \times 0,85 = 1700 \text{ kW}$$

$$I_L = \frac{2.000.000}{\sqrt{3} \times 2300 \times 0,85} = 590,6 \text{ Ampere}$$

$$R_a = \frac{0,08}{2} \times 1,3 = 0,052 \text{ ohm/fasa}$$

Rugi angin dan geseran	=	18,8 kW
Rugi inti	=	37,6 kW
Rugi medan = $I_f V_f = (125 \times 72)/1000$	=	9,0 kW
Rugi jangkar = $3I_L^2 R_a = 3 \times (590,6)^2 \times 0,052$	=	54,4 kW
Rugi beban sasar	=	2,2 kW
Rugi total	=	122,0 kW

$$Efisiensi = \eta = \left(1 - \frac{122}{1700 + 122}\right) \times 100\% = 93,3\%$$

### 13.16 Kerja Paralel Generator Serempak

#### 13.16.1 Maksud dan tujuan kerja paralel

1. Memperbesar kapasitas daya yang dibangkitkan untuk melayani beban yang besar atau konsumen, karena perkembangan beban yang terus meningkat.
2. Menjaga kontinuitas pelayanan kepada konsumen karena ada generator serempak atau ada pembangkit yang akan diperbaiki atau diservis.

#### 13.16.2 Syarat kerja paralel

1. Harga sesaat *EMF* kedua generator serempak harus sama besarnya dan arah vektornya bertentangan atau berlawanan. Sama halnya apabila satu generator serempak diparalel dengan jala-jala.
2. Fase kedua generator serempak sama dan vektornya saling berlawanan atau bertentangan, demikian juga untuk generator serempak yang diparalel dengan jala-jala.
3. Urutan fase kedua generator serempak atau antara generator serempak dengan jala-jala harus sama.

Biasanya pada pembangkit tenaga listrik peralatan yang digunakan untuk memparalelkan adalah *synchroscope* untuk sistem yang lama, akan tetapi pada pembangkit dengan sistem yang baru, digunakan alat ukur (meter) yang ada tulisannya *fast* dan *slow*.

### 13.17 Soal Latihan

#### Soal Teori:

1. Jelaskan kegunaan dari mesin serempak.
2. Jelaskan perbedaan generator serempak dan generator arus searah.
3. Jelaskan konstruksi dari mesin serempak.
4. Jelaskan prinsip kerja generator serempak/sinkron.
5. Jelaskan dan gambarkan diagram vektor untuk generator serempak dengan berbagai jenis beban.

6. Jelaskan yang dimaksud dengan regulasi tegangan pada generator serempak.
7. Apa yang dimaksud dengan efisiensi dari generator serempak. Rugi-rugi apa saja yang timbul pada generator serempak.

**Soal Perhitungan:**

1. Suatu generator serempak 3 fasa, 16 kutub, hubungan Y mempunyai alur 144 dengan 10 penghantar per alur. Fluks per kutub 30 mWb. Hitunglah frekuensi, tegangan per fase dan antara fasa jika kecepatan 375 rpm.
2. Suatu generator serempak 3 fasa, 6000 kVA, 6.600 volt, hubungan Y, 50 Hz melayani beban penuh dengan faktor daya 0,8 mengikuti dan tegangan terminal 6.600 volt, jika resistansi kumparan jangkarnya 0,2 ohm per fasa dan reaktansi sinkronnya 5,8 ohm per fase, hitung *EMF* antara fasa yang harus dibangkitkan.
3. Suatu generator serempak 3 fasa, 1200 kVA, 6600 volt, hubungan bintang dengan resistansi jangkar 0,4 ohm per fasa dan reaktansi sinkron 6 ohm per fasa melayani beban penuh pada tegangan normal. Hitunglah tegangan terminal untuk eksitasi yang sama dan arus beban yang sama pada faktor daya 0,8 mendahului.
4. Suatu generator serempak 3 fasa, 100 kVA, 11.000 volt hubungan Y, mempunyai resistansi jangkar 0,45 ohm per fasa dan reaktansi sinkron 4,62 ohm per fasa. Hitunglah regulasi tegangan dari generator serempak tersebut waktu beban penuh pada faktor daya 0,8 mengikuti dan faktor daya 0,8 mendahului.

## REFERENSI

- Berahim, Ir. Hamzah.** (1994). *Teknik Tenaga Listrik*, Penerbit Andi Offset, Yogyakarta.
- Chapman, Stephen J.** (2005). *Electric Machinery Fundamentals, Fourth Edition*, McGraw-Hill Companies. Inc.
- Sumanto, Drs., MA.** (1991). *Mesin Arus Searah*, Penerbit Andi Offset, Yogyakarta.
- Theraja, B.L., Theraja, A.K.** (2005). *A Textbook of Electrical Technology Volume I: Basic Electrical Engineering*, S. Chand & Company, Ltd.
- Zuhail.** (2000). *Dasar Teknik Tenaga Listrik*, P.T Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.

## BIOGRAFI PENULIS



**Eva Magdalena Silalahi, ST., MT.**

Lahir tanggal 28 Agustus 1974 di Kota Palembang, Sumatera Selatan.

Sejak 2017 menjadi Dosen Tetap Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia (UKI), Cawang, Jakarta.

Menyelesaikan S1 Teknik Elektro dari Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya tahun 1999 di Inderalaya, Sumatra Selatan.

Selanjutnya, mendapatkan gelar S2 Teknik Elektro dari Program Magister S2 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia (UI) pada tahun 2010 di Kampus UI Depok, Jawa Barat.

Bidang peminatan adalah: Kualitas Daya Listrik dan Masalah Harmonik Listrik, *Power Electronic*, dan *Renewable Energy*, serta Pemrograman untuk Aplikasi Teknik dan aplikasi AI dan *Data Science*.



## UKI PRESS

Pusat Penerbit dan Pencetakan  
Universitas Kristen Indonesia  
Jl. Mayjen Sutoyo No. 2, Cawang  
Jakarta Timur 13630



[ukipressdigital.uki.ac.id](http://ukipressdigital.uki.ac.id)

ISBN 978-623-8737-07-9



9 786238 737079