

# Pengetahuan Bahan Listrik

Syachyudin, ST, MT



ANGKASABUMI PRESS

# **PENGETAHUAN BAHAN LISTRIK**

**SYAFRIYUDIN, ST,MT**

**AKPRIND PRESS  
YOGYAKARTA**

Undang-undang Nomor 7 tahun 1987  
Tentang Hak Cipta  
Pasal 44

- (1) Barang siapa dengan sengaja mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan /atau denda paling banyak Rp.100.000.000,00 (seratus juta rupiah)
- (2) Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan / atau denda paling banyak Rp.50.000.000,00 (lima puluh juta rupiah)

## **PENGETAHUAN BAHAN LISTRIK**

*Hak cipta 2013 pada penullis, dilarang keras mengutip, menjiplak,  
Mem fotocopy baik sebagian atau keseluruhan isi b uku ini  
Tanpa mendapat izin tertulis dari pengarang dan penerbit*

Penulis : Syafriyudin, ST,MT  
Page Make Up : Syafriyudin, ST,MT  
Desain Cover : By Aulia  
Dicetak Oleh : AKPRIND PRESS

ISBN : 978-602-7619-25-8

**HAK CIPTA DILINDUNGI OLEH UNDANG-UNDANG**

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur alhamdulillah penulis ucapkan ke hadirat Allah SWT, dimana akhirnya penulis dapat menyelesaikan buku Pengetahuan Bahan Listrik ini sekalipun masih banyak kekurangan di sana sini dan penulis sangat menyadari itu serta memberanikan diri untuk menulis buku ini.

Buku ini disusun berdasarkan bahan ajar yang digunakan penulis yang ditulis dalam bentuk diktat, buku ini sudah cukup memadai dipakai sebagai bahan mahasiswa untuk belajar mandiri khususnya mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, buku ini dibuat untuk perkuliahan selama satu semester dan diharapkan dapat membantu mahasiswa dalam memahami permasalahan di bidang bahan listrik.

Penulis menyadari bahwa isi buku ini masih jauh dari sempurna, hal mana disebabkan antara lain oleh waktu persiapan yang sangat terbatas, kekurangan-kekurangan serta saran-saran membangun dari para rekan dan para pembaca akan diperhatikan dan akan dilengkapi selanjutnya, harapannya buku ini dapat memberikan manfaat dengan menambah pengetahuan dalam bidang Mesin-mesin listrik khususnya bagi mahasiswa yang mengambil mata kuliah ini.

Akhirulkalimat kepada semua rekan yang telah memberikan dorongan dan bantuan baik secara materil maupun spiritual dan kepada semua pihak yang telah membantu selesainya penulisan hingga dapat diterbitkan penulis mengucapkan banyak terima kasih yang tak terhingga,

Yogyakarta, Januari 2013  
Penulis



# DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	iii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	v
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	ix
<b>DAFTARTABEL</b> .....	xii
<b>BAB I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1. Umum .....	1
1.1 Elektron Dalam Atom .....	2
1.2 Spektrum Garis .....	3
1.3 Teori Bohr .....	4
1.4 Konfigurasi Elektron.....	6
1.4.1 Susunan Bilangan Kuantum .....	7
1.5 Energi Elektron .....	7
1.5.1 Teori Atom Demokritus .....	7
1.5.2 Teori Atom Dalton .....	7
1.5.3 Model Atom Thomson.....	8
1.5.4 Model Atom Rutherford .....	8
1.5.5 Model Atom Bohr .....	9
1.6 Susunan Berkala Unsur - Unsur .....	10
1.7 Molekul dan Ikatan Kimia .....	13
1.7.1 Macam-Macam Ikatan Kimia .....	13
1.7.2 Polarisasi Ikatan Kovalen .....	16
1.7.3 Ikatan Ion = Elektrovalen = Heteropolar .....	18
1.8 Sejarah Perkembangan Teori Atom Menurut Para Ahli .....	18
1.9 Benda Padat .....	20
1.10 Klasifikasi .....	23
Pertanyaan .....	24
<b>BAB II. BAHAN PENGHANTAR / KONDUKTOR</b> .....	<b>25</b>
2.1 Umum .....	25
2.2 Karakteristik penghantar .....	25
2.2.1 Karakteristik listrik .....	25
2.2.2 Karakteristik mekanis .....	31
2.2.3 Kapasitas penyaluran arus dari penghantar .....	36
2.2.4 Daya hantar panas .....	38
2.2.5 Timbulnya daya elektromotoris termo .....	38
2.2.6 Jenis – jenis penampang bahan penghantar .....	38
2.3 Bahan konduktor.....	39
2.3.1 Bahan konduktor berbentuk padat .....	39
2.3.2 Bahan konduktor berbentuk cair .....	44
2.3.3 Bahan konduktor berbentuk gas.....	45
2.4 Bahan Tahanan (Resistor) .....	46
2.4.1 Wolfram .....	46
2.4.2 Timbel/Timah Hitam (Pb) .....	47
2.4.3 Nikel (Ni) .....	47
2.4.4 Campuran Nikel (Nikel alloy) .....	47
2.5 Thermistor .....	47
2.6 Bahan Kotak .....	49
2.6.1 Syarat – syarat bahan yang diperlukan sebagai alat kontak listrik .....	49
2.6.2 Tahanan pada kontak listrik .....	49
Soal latihan.....	52
<b>BAB III. BAHAN SEMI KONDUKTOR</b> .....	<b>53</b>
3.1 Pendahuluan.....	53
3.2 Sifat – sifat fisis bahan semi konduktor .....	53
3.2.1 Struktur Fisis Bahan Semi konduktor .....	53

3.3	Pengaruh Panas dan Cahaya .....	55
3.4	Macam Bahan Semi Konduktor .....	55
3.4.1	Intinsic semi konduktor (bahan semi konduktor murni) .....	55
3.4.2	Extrinsic semi konduktor (impurity semi konduktor – semi konduktor yang tidak murni) .....	56
3.4.3	N-type semi konduktor .....	56
3.4.4	P-type semi konduktor .....	57
3.5	Transistor (Triode semi konduktor ) .....	58
3.5.1	Transistor jenis PNP .....	59
3.5.2	Transistor jenis NPN .....	60
3.5.3	Dioda .....	60
3.6	Bahan – bahan semi konduktor .....	61
3.6.1	Germanium .....	61
3.6.2	P – Germanium dan N - Germanium .....	62
3.6.3	Germanium untuk transistor .....	62
3.6.4	Germanium sebagai diode .....	62
3.7	Silikon .....	63
3.8	Macam – macam Semikonduktor dan Penggunaannya .....	63
3.9	Aplikasi Semikonduktor .....	64
3.9.1	Sifat elektrik bahan semikonduktor .....	64
	Soal latihan.....	65
<b>BAB IV.</b>	<b>BAHAN PENYEKAT .....</b>	<b>67</b>
4	Pendahuluan.....	67
4.1	Pengertian Bahan Penyekat .....	67
4.2	Sifat – sifat bahan penyekat .....	69
4.2.1	Sifat Listrik .....	69
4.2.1.1	Tahanan isolasi.....	69
4.2.1.2	Kapasitas .....	71
4.2.1.3	Kerugian sudut dielektrik .....	71
4.2.1.4	Kekuatan Dielektrik .....	72
4.3	Sifat mekanis .....	72
4.4	Sifat thermis.....	73
4.5	Sifat kimia .....	73
4.6	Pembagian bahan isolasi .....	73
4.6.1	Bahan isolasi yang bersifat gas .....	73
4.6.1.1	Udara .....	74
4.6.1.2	Sulphur Hexa Fluorida ( SF <sub>6</sub> ) .....	75
4.6.1.3	Keunggulan dan Kelemahan Gas SF <sub>6</sub> Sebagai medium Isolasi pada GIS .....	76
4.6.1.4	Nitrogen .....	76
4.6.1.5	Hidrogen .....	76
4.6.1.6	Gas Carbon Dioksida (CO <sub>2</sub> ) .....	77
4.7	Bahan penyekat berbentuk cair .....	77
4.8	Cara-cara Mendapatkan Bahan Isolasi .....	77
4.8.1	Penyulingan Asam (acid refinery) .....	77
4.8.2	Ekstrasi Pelarut (soluen ekstraksi) .....	78
4.8.3	Hidrogenisasi .....	78
4.8.4	Proses Kombinasi.....	78
4.9	Sifat-sifat Isolator Minyak .....	78
4.9.1	Sifat-sifat Fisika Isolator Minyak .....	79
4.9.2	Sifat-sifat Kimia Isolator Cair (Minyak) .....	80
4.9.3	Sifat-sifat Listrik Isolator Minyak .....	81
4.9.4	Syarat-syarat Isolator Minyak Yang Baik.....	82
4.9.5	Aplikasi Penggunaan .....	83
4.10	Tegangan Gagal Isolator Minyak .....	84
4.10.1	Kriteria Tegangan Tembus Menurut Townsend .....	84
4.10.2	Mekanisme Pembentukan Streamer .....	85
4.10.3	Tegangan Tembus (Breakdown Voltage) .....	85

4.10.4	Pengaruh Gelembung-gelembung (Bubble Gas) pada Tegangan Tembus .....	86
4.10.5	Pengaruh Kecepatan Aliran Partikel dan Cairan Terhadap Tegangan Tembus .....	86
4.10.6	Pengaruh Suhu .....	87
4.10.7	Pengaruh Kelembaban (kandungan air) .....	87
4.10.8	Minyak transformator .....	88
4.10.9	Minyak penghubung .....	88
4.10.10	Minyak Kabel .....	89
4.11	Bahan penyekat berbentuk padat .....	89
4.11.1	Bahan tambang .....	90
4.11.1.1	Batu Pualam .....	90
4.11.1.2	Asbes .....	90
4.11.1.3	Mika .....	90
4.11.1.4	Mekanit .....	91
4.12	Bahan – bahan berserat .....	91
4.13	Bahan penyekat keramik .....	91
4.13.1	Porselin .....	91
4.13.2	Steatit .....	95
4.13.3	Mayolika .....	95
4.13.4	Lak Isolasi .....	95
4.14	Kaca .....	95
4.14.1	S i t o l .....	97
4.15	Bahan plastic .....	97
4.15.1	Polimer .....	98
4.15.2	Proses Pembentukan Polimer (Polimerisasi) .....	99
4.15.3	Berat Molekul dan Derajat Polimerisasi .....	101
4.15.4	Ikatan-ikatan dalam Polimer .....	103
4.15.5	Struktur Rantai Molekul Polimer .....	103
4.15.6	Derajat Kekristalan Polimer .....	103
4.16	Perilaku Mekanika Polimer Thermoplastik .....	104
4.16.1	Perilaku Thermoplastik Saat Dideformasi .....	104
4.16.2	Pengendalian Struktur dan Sifat-sifat Polimer Thermoplastik .....	107
4.16.3	Pengaruh Kenaikan Temperatur dan Laju Regangan Terhadap Polimer Thermoplastik .....	108
4.16.3.1	Karet (Elastomer) .....	109
4.16.3.2	Proses Pembuatan Karet .....	109
4.16.3.3	Perilaku Elastis Karet .....	110
4.17	Polimer Thermoset .....	112
4.17.1	Damar .....	112
4.17.2	Bimuten .....	113
4.17.3	Kompon .....	113
4.17.4	Lilin dan Paraffin .....	113
4.18	Klasifikasi bahan penyekat listrik .....	113
4.18.1	Klasifikasi menurut standart AIEE .....	113
4.18.2	Standard yang lain .....	114
	Latihan soal .....	115
<b>BAB V.</b>	<b>BAHAN – BAHAN MAGNETIK .....</b>	<b>117</b>
5.1	Definisi magnit .....	117
5.1.1	Magnit alam .....	117
5.1.2	Magnit buatan .....	117
5.1.2.1	Dengan gosokan .....	117
5.1.2.2	Menggunakan arus listrik .....	118
5.1.3	Bahan Inti Magnet .....	118
5.2	Bahan – bahan magnit .....	119
5.2.1	Bahan Ferromagnetik .....	119
5.2.2	Bahan Paramagnetik .....	120
5.2.3	Bahan diamagnetic .....	120

5.2.4	Bahan non-magnetik.....	120
5.3	Teori magnit.....	120
5.3.1	Menurut teori weber.....	120
5.3.2	Menurut Weiss.....	121
5.4	Bahan Inti Magnet Besi Lunak.....	121
5.4.1	Bahan Inti Magnet Ferit dan Garnet.....	122
5.4.2	Bahan Inti Magnet Besi Keras.....	122
5.4.3	Grafik Magnetisasi dan Gaya kemagnetan.....	123
5.4.4	Energi dan Daya-Daya pada Inti Magnet.....	127
5.4.5	Hukum Ohm untuk Rangkaian Magnet.....	130
5.5	Rugi – rugi besi pada bahan magnetik.....	131
5.5.1	Rugi Hysterisis (Ph).....	131
5.5.2	Rugi arus pusar (eddy current losses).....	133
5.5.3	Rugi besi.....	135
	Soal – soal.....	135
	<b>Daftar Pustaka.....</b>	<b>137</b>
	<b>Glosarium.....</b>	<b>139</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	1.1	Elektron Dalam Atom .....	3
Gambar	1.2	Spektrum cahaya polikromatik .....	3
Gambar	1.3	Spektrum garis.....	4
Gambar	1.4	Deret Balmer untuk atom hidrogen .....	4
Gambar	1.5	Model atom Bohr .....	5
Gambar	1.6	Proses eksitasi dan emisi .....	6
Gambar	1.7	Elektron valensi beberapa unsur periode 2 dan periode 3 .....	7
Gambar	1.8	Bagan gaya tarik antara inti dan electron hidrogen .....	8
Gambar	1.9	Gerak elektron dan arah gaya magnit .....	9
Gambar	1.10	Spektrum garis hydrogen .....	9
Gambar	1.11	Skema bor dan stoner untuk beberapa unsur susunan berkala ...	11
Gambar	1.12	Ion - ion yang terbentuk tarik – menarik secara elektrostatik .....	14
Gambar	1.13	Dua alternative bentuk HCL .....	15
Gambar	1.14	Ikatan Hidrogen pada H <sub>2</sub> O dan HF .....	15
Gambar	1.15	Struktur Kristal Garam Dapur (NaCl) .....	20
Gambar	1.16	Struktur Kristal Intan .....	20
Gambar	1.17	Diagram eita energi pada suatu benda .....	21
Gambar	1.18	Proses terjadinya elektron konduksi .....	22
Gambar	1.18	Diagram pita energy bahan konduktor(1.13a) Bahan semi konduktor(1.13b) dan Bahan isolator(1.13c) .....	22
Gambar	2.1	Pengaruh ketidakmurnian terhadap Konduktivitas listirk untuk bahan tembaga .....	26
Gambar	2.2	Pengaruh ketidakmurnian terhadap Konduktivitas listirk untuk aluminium .....	26
Gambar	2.3	Pertambahan harga tahanan listrik sebagai fungsi dari Waktu pada normal temperature range .....	28
Gambar	2.4	Kerapatan arus pada penghantar dengan jari jari r1Dan r2 yang dialiri oleh arus bolak balik .....	30
Gambar	2.5	Gambaran singkat uji tarik dan datanya .....	32
Gambar	2.6	Kurva tegangan - regangan .....	33
Gambar	2.7	Dimensispesimenujitarik (JIS Z2201) .....	33
Gambar	2.8	Ilustrasi pengukur regangan pada spesimen .....	33
Gambar	2.9	Profil data hasil uji tarik .....	34
Gambar	2.10	Penentuan tegangan luluh (yield stress) untuk kurva tanpa Daerah linier. ....	35
Gambar	2.11	Tegangan dan regangan berdasarkan panjang bahan sebenarnya	36
Gambar	2.12	Penampang bahan penghantar (a) bulat, (b) segi empat, (c) segi empat tebal (d) kanal, (e) Stranded .....	39
Gambar	2.13	Termo kopel pada bahan CU dan NI .....	39
Gambar	2.14	Dua buah konduktor yang terletak parallel .....	43
Gambar	2.15	Prinsip aliran elektron pada lampu flourecent .....	45
Gambar	2.16	Simbol dari thermistor .....	48
Gambar	2.17	Karakteristik dari thermistor .....	48
Gambar	3.1	Struktur atom bahan semi konduktor murni .....	54
Gambar	3.2	Cara pengangkatan elektron- electron pada bahan Semi konduktor murni .....	54
Gambar	3.3	Karakteristik tahanan jenis sebagai fungsi temperature .....	55
Gambar	3.4	N - Type Semi konduktor .....	56
Gambar	3.5	Energi Level band pada bahan N type semi konduktor .....	57
Gambar	3.6	P – Type semi konduktor .....	57
Gambar	3.7	Energi Level band pada bahan P type semi konduktor .....	58
Gambar	3.8	Transistor through-hole (dibandingkan dengan pita ukur sentimeter). ....	58

Gambar	3.9	Transistor NPN dan PNP .....	58
Gambar	3.10	Transistor jenis PNP (a) PNP junction transistor (b) symbol transistor jenis PNP .....	59
Gambar	3.11	Keadaan fisis PNP junction transistor .....	59
Gambar	1.12	Transistor jenis NPN (a) NPN junction transistor (b) symbol transistor jenis NPN .....	60
Gambar	3.13	Keadaan fisis NPN junction transistor .....	60
Gambar	3.14	simbol sambungan p-n .....	60
Gambar	3.15	forward bias. ....	61
Gambar	3.16	Karakteristik tahanan jenis sebagai fungsi dari temperatur bahan germanium .....	62
Gambar	3.17	PNP Transistor .....	62
Gambar	4.1	Diagram pita energi bahan isolator .....	68
Gambar	4.2	Penampang kabel membujur .....	70
Gambar	4.3	Sudut kerugian dielektrik .....	71
Gambar	4.4	$V_t = f$ (celah udara) pada $p = 1 \text{ atm}$ , $F = 50\text{Hz}$ .....	74
Gambar	4.5	Molekul sulphur hexa fluorida .....	75
Gambar	4.6	Proses atau langkah pembuatan isolasi cair (minyak) .....	78
Gambar	4.7	Pengaruh frekuensi terhadap tetapan dielektrik .....	81
Gambar	4.8	Arus Pertumbuhan Townsend .....	84
Gambar	4.9	Pembentukan streamer .....	85
Gambar	4.10	pengaruh suhu terhadap tegangan breakdown minyak .....	87
Gambar	4.11	Alat pengujian tegangan tembus minyak transformator .....	88
Gambar	4.12	isolator porselin.....	92
Gambar	4.13	Pembakaran porselin membujur .....	93
Gambar	4.14	Pembakaran porselin melintang dan jenis terowongan .....	93
Gambar	4.15	Kurva $a = f$ ( $\theta$ ) pada porselen .....	94
Gambar	4.16	Tegangan kerja $= f$ (jumlah isolator) .....	94
Gambar	4.17	Perkembangan Bahan Polimer .....	98
Gambar	4.18	Struktur Molekul Polimer Polyethylene .....	98
Gambar	4.19	Jenis-jenis Polimer.....	99
Gambar	4.20	Proses Pembentukan Polimer (Polimerisasi) .....	100
Gambar	4.21	Proses Pembentukan Polyethylene .....	100
Gambar	4.22	Proses Pembentukan Bakelite .....	101
Gambar	4.23	Berat Molekul Rata-rata suatu Thermoplastik .....	101
Gambar	4.24	Derajat Polimerisasi dari suatu Polimer, yaitu Polyethylene .....	102
Gambar	4.25	Effect MW and DP on properties .....	102
Gambar	4.26	Ikatan Primer Kovalen di Dalam Molekul thylene $C_2H_4$ .....	103
Gambar	4.27	Struktur Rantai Molekul Polimer .....	103
Gambar	4.28	Struktur Rantai Molekul PE Menunjukkan Daerah Kristalin (hijau) dan Daerah Amorphous (biru) .....	104
Gambar	4.29	Spesimen Uji Tarik dan Perilaku Polimer Thermoplastik pada Umumnya Saat Mengalami Pembebanan di Mesin Uji tarik .....	104
Gambar	4.30	Kurva Tegangan Regangan Suatu Polimer Thermoplastik .....	105
Gambar	4.31	Perilaku Elastik Polimer Thermoplastik .....	105
Gambar	4.32	Perilaku Plastik Polimer Thermoplastik .....	106
Gambar	4.33	Penciutan dan Kristalisasi Polimer Thermoplastik morpous pada Pengujian Tarik.....	106
Gambar	4.34	Elemen Maxwell dan Voight-Kelvin untuk Mensimulasikan Perilaku Visko-elastik.....	106
Gambar	4.35	Polimer Simetris dan Asimetris .....	107
Gambar	4.36	Ke'taktik'an dari Polimer dengan mer Asime tris .....	107
Gambar	4.37	Rantai Molekul Linier dan Linier dengan Cabang .....	108
Gambar	4.38	Ko-polimer dan 4 Jenis Ko-polimerisasi .....	108
Gambar	4.39	Perubahan Kekakuan dan Struktur Polimer Thermoplastik akibat Kenaikan Temperatur .....	109
Gambar	4.40	Proses Pembuatan Karet Alam (Natural Rubber) .....	109
Gambar	4.41	Pembentukan Kaitan Silang (Cross Link) dengan Proses Penambahan Sulfur (Vulkanisasi) .....	110

Gambar	4.42	Deformasi Elastis pada Karet .....	110
Gambar	4.43	Peran Kaitan Silang di Dalam Deformasi Elastis Karet.....	111
Gambar	4.44	Perilaku Elastis Karet Alam yang Belum dan Telah ivulkanisasi ..	111
Gambar	4.45	Struktur Rantai Molekul Karet di Bawah dan di Atas Temperatur transisi Gelas .....	112
Gambar	4.46	Perilaku Elastis tanpa Kaitan Silang pada Elastomer Thermoplastik .....	112
Gambar	5.1	Pembuatan magnit dengan gosokan .....	117
Gambar	5.2	Pembuatan magnit dengan arus listrik .....	118
Gambar	5.3	Inti magnet berbentuk toroidal dan kumparan .....	123
Gambar	5.4	Grafik magnetisasi normal .....	124
Gambar	5.5	Grafik m-H dari bahan feromagnetik sheet steel, cast steel dan cast iron .....	125
Gambar	5.6	Grafik B-H dari bahan feromagnetik sheet steel, cast steel dan cast iron pada H rendah atau B belum jenuh .....	125
Gambar	5.7	Grafik histerisis bahan feromagnetik .....	126
Gambar	5.8	Bentuk grafik histerisis untuk besi keras dan besi lunak .....	127
Gambar	5.9	Energi dalam inti magnet (luasan antara B dan H) .....	127
Gambar	5.10	Grafik loop histerisis normal bahan feromagnetik .....	129

## DAFTAR TABEL

Tabel	1.1	Jumlah Elektron tertutup dalam tiap kulit .....	11
Tabel	1.2	Tabel unsur – unsur atom .....	12
Tabel	1.3	Perbedaan antara Senyawa Ion dengan Senyawa Kovalen.....	17
Tabel	2.1	Tahanan jenis dari beberapa bahan.....	27
Tabel	2.2	Tahanan jenis dari bahan campuran.....	27
Tabel	2.3	Harga-harga T0 dan untuk bahan konduktor standart .....	29
Tabel	2.4	Resistivitas dari bahan konduktor standart untuk berbagai temperatur .....	29
Tabel	2.5	Kemampuan hantaran arus untuk berbagai penghantar saluran udara.....	37
Tabel	2.6	Ketentuan – ketentuan teknik yang lain dari bahan .....	38
Tabel	2.7	Kesetaraan kimia listrik beberapa bahan .....	44
Tabel	3.1	Daftar klas dari beberapa bahan .....	56
Tabel	4.1	Sifat beberapa Gas.....	75
Tabel	4.2	Standart setara nilai dari karakteristik minyak yang baik .....	82
Tabel	4.3	Contoh peralatan yang menggunakan minyak isolator .....	83
Tabel	4.4	Tegangan Tembus standart Minyak Transformator .....	88
Tabel	4.5	Pengelompokkan isolator menurut jenis bahannya .....	89
Tabel	4.6	Pengelompokkan isolator bahan padat dan batas suhunya pada mesin listrik.....	89
Tabel	4.7	Kuat dielektrik kd dan tegangan dadal Vd Berbagai macam isolator bahan padat.....	89
Tabel	4.8	Klasifikasi bahan penyekat.....	113
Tabel	4.9	Klasifikasi bahan penyekat.....	114
Tabel	5.1	Perbandingan $M_r$ (awal), $P_h$ dan B jenuh dari besi lunak .....	122
Tabel	5.2	Pemakaian besi lunak .....	122
Tabel	5.3	Pemakaian besi keras .....	123
Tabel	5.4	Analogi antara sistem kemagnetan dan kelistrikan.....	131
Tabel	5.5	Bahan – Bahan Teras Elektromagnet .....	134

# BAB I

## PENDAHULUAN

Tujuan Instruksional : Mahasiswa dapat mengerti dan memahami tentang teori atom elektron dalam atom, yang meliputi teori atom bohr, teori dalton, teori kuantum, energi eletron, serta ikatan-ikatan antar atom seperti ikatan logam, ikatan vanderwals , ikatan kovalen, molekul ikatan kimia, macam ikatan kimia hiteropolar, susunan berkala unsur-unsur atom, konfigurasi elektron, diagram pita energi, mahasiswa dapat memahami konsep tentang proses terbentuknya suatu benda yang berasal dari susunan atom, dimana atom itu disusun oleh sejumlah elektron, proton dan neutron, yang kemudian akan membentuk suatu zat/ benda yang didasarkan atas susunan atom pada benda/zat tersebut, seperti akan menjadi benda/zat padat, cair, gas, dan kemudian berdasar kan atas sifat nya menjadi konduktor , isolator , semikonduktor berdasarkan diagram pita energi pada masin-masing zat/benda,

Pada bab ini akan membahas hal-hal yang mengenai :

- a. Pengertian umum
- b. Teori atom
- c. Pengertian elektron
- d. Energi elektron
- e. Elektron dalam atom
- f. Ikatan antar atom.
- g. Bahan padat.

### I. Umum.

“Atom” sudah ada sejak zaman Leucippus (500-600 SM) dan Democritus (400 SM). Bagaimana konsep dasar tentang atom itu? Konsep dasar tentang atom sebenarnya sudah lama dikenal orang. Konsep tersebut antara lain berasal dari pemikiran orang Yunani kuno yang dipelopori oleh Democritus yang hidup pada akhir abad ke-4 dan awal abad ke-5 sebelum masehi.

Ilmu bahan listrik adalah merupakan bagian dari ilmu Logam (metalurgi), di mana di dalam “bahan listrik” terutama di bahas mengenai sifat-sifat bahan yang di pergunakan/ berhubungan dengan listrik. Kita semua telah mengetahui bahwa suatu bahan/zat terdiri dari molekul-molekul, tiap – tiap molekul terdiri atom itu sendiri di bangun oleh satu inti atom bermuatan positif yang di sebut proton dan di kelilingi oleh satu atau lebih elektron yang bermuatan negatif.

**Menurut teori yang dikemukakannya, suatu benda dapat dibagi menjadi bagian-bagian yang sangat kecil yang akhirnya tidak dapat dibagi lagi yang disebut atom. Kata atom berasal dari bahasa Yunani yaitu ‘atomos’ yang berarti “tidak dapat dibagi”.**

Teori kwantoum menyatakan bahwa gerakan elektron –elektron dalam mengelilingi intinya mengikuti lintasan yang berbeda-beda akan tetapi tertentu. Dan untuk setiap lintasan elektron yang tertentu ini memiliki energi tertentu pula. Adapun besarnya energi ini tergantung pada jarak rata – rata lintasan elektron tersebut terhadap intinya. Adalah mungkin bahwa beberapa elektron walaupun lintasan yang sama, sehingga akan memiliki energi yang sama pula. Elektron – elektron yang demikian di katakan berada dalam satu energi level.

Lintasan elektron –elektron yang berbeda-beda ini dapat di nyatakan dalam beberapa bilangan kwantum, yakni :

- 1<sup>o</sup>. “Principle quantum number”,  $n$ , yang menyatakan adanya beberapa bilangan kwantum elektron terhadap intinya.  
 $n$  memiliki harga 1,2,3 .....
- 2<sup>o</sup>. “Orbital/Angular momentum quantum number”,  $\ell$ , yang menyatakan bentuk lintasan elektron yang satu terhadap yang lain.  
 $\ell$  mempunyai harga  $0 \leq \ell \leq n - 1$
- 3<sup>o</sup>. “Magnetik qunqtm number”,  $m$ , yang menyatakan letak lintasan elektron

h yang satu terhadap yang lain.  
 m mempunyai harga  $-\ell \leq m \leq \ell$

4<sup>o</sup>. "Spin quantum number",  $m_s$ , yang menyatakan perputaran elektron terhadap porosnya.

$m_s$  mempunyai harga  $-\frac{1}{2}$  dan  $\frac{1}{2}$

dari kuantum state yang telah di sebut di atas terdapat suatu hubungan :  $0 \leq \ell \leq n-1$   
 $-\ell \leq m \leq \ell$  ..... (1.1)

$$m_s = \pm \frac{1}{2}$$

jadi untuk  $n = 1 \rightarrow \ell$  dan  $m = 0, m_s = \pm \frac{1}{2}$

$n = 2 \rightarrow \ell = 0, 1$

Untuk  $\ell = 0 \rightarrow m = 0$  dan  $m_s = \pm \frac{1}{2}$

$\ell = 1 \rightarrow m = -1, 0, 1$  dan  $m_s = \pm \frac{1}{2}$

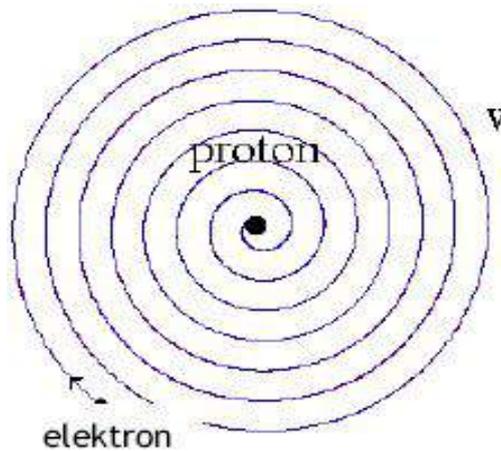
dan seterusnya.

Dalam bentuk terminologi spektroskopi " $\ell$ " di nyatakan dalam huruf yaitu, untuk :

- $\ell = 0$  dinyatakan dengan huruf S
- $= 1$  dinyatakan dengan huruf p
- $= 2$  dinyatakan dengan huruf d
- $= 3$  dinyatakan dengan huruf f
- $= 4$  dinyatakan dengan huruf g
- $= 5$  dinyatakan dengan huruf h
- $= 6$  dinyatakan dengan huruf i

### 1.1. Elektron Dalam Atom.

Model atom yang dikemukakan oleh Joseph John Thompson mempunyai banyak kelemahan, demikian pula dengan model atom yang dikemukakan oleh Ernest Rutherford. Model atom Rutherford tidak dapat menjelaskan alasan mengapa elektron tidak dapat jatuh kedalam inti. Fisika klasik menyatakan bahwa apabila terdapat suatu partikel bermuatan yang bergerak menurut lintasan lengkung maka energinya akan hilang dalam bentuk radiasi. Pernyataan fisika klasik ini menjadi persoalan bagi model atom yang dikemukakan oleh Rutherford karena jika elektron bergerak mengelilingi inti, maka elektron akan kehilangan energinya dan energi kinetik elektron akan terus berkurang. Gaya tarik inti atom terhadap elektron akan menjadi lebih besar daripada gaya sentrifugal lintasan elektron dan menyebabkan lintasan menjadi spiral dan akhirnya elektron jatuh kedalam inti atom. Apabila elektron jatuh kedalam inti atom, maka atom menjadi tak stabil. Hal ini bententangan dengan pernyataan umum bahwa atom stabil.



Gambar 1.1. Lintasan spiral elektron

## 1.2. Spektrum garis

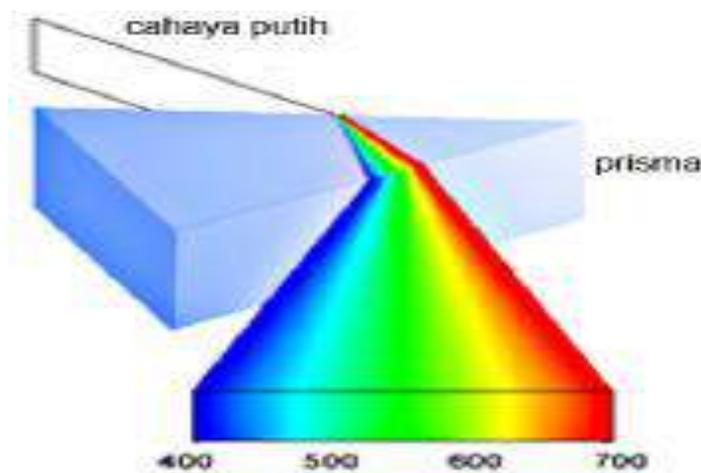
Menurut Max Planck radiasi elektromagnetik bersifat diskontinyu atau dalam bentuk kuantum. Diskontinuitas radiasi elektromagnetik dikuatkan oleh efek fotolistrik yang dikembangkan oleh Albert Einstein. Sedangkan kuantisasi/kuanta energi digunakan oleh Niels Bohr dalam momentum sudut elektron untuk pengembangan teorinya tentang atom hidrogen.

Apabila berkas cahaya polikromatis seperti lampu listrik dan sinar matahari dilewatkan melalui prisma maka akan diperoleh spektrum kontinyu yang terdiri dari berbagai warna penyusunnya. Spektrum garis dihasilkan apabila sumber cahaya polikromatik seperti lampu listrik dan sinar matahari diganti oleh busur listrik berisi gas hidrogen maka akan dihasilkan spektrum yang tidak kontinyu. Spektrum yang tidak kontinyu berupa sederetan garis berwarna yang disebut spektrum garis tak kontinyu.

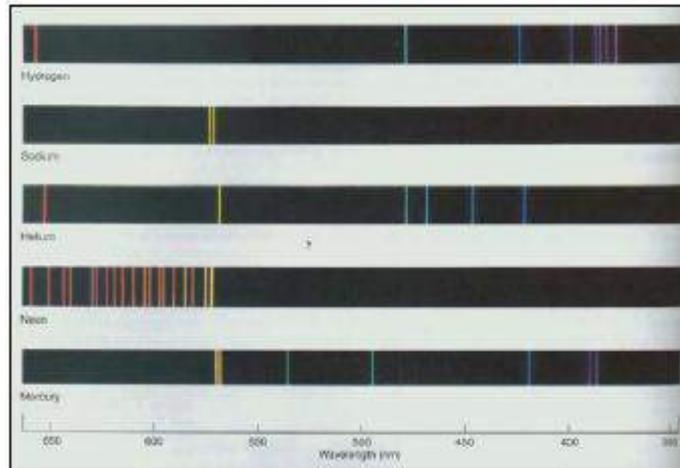
Spektrum garis didapat dengan cara sebagai berikut:

- Zat yang diselidiki spektrumnya diuapkan pada temperatur tinggi
- Uap yang terbentuk diletakkan diantara dua elektroda grafit
- Listrik bertegangan tinggi dialirkan melalui elektroda grafit

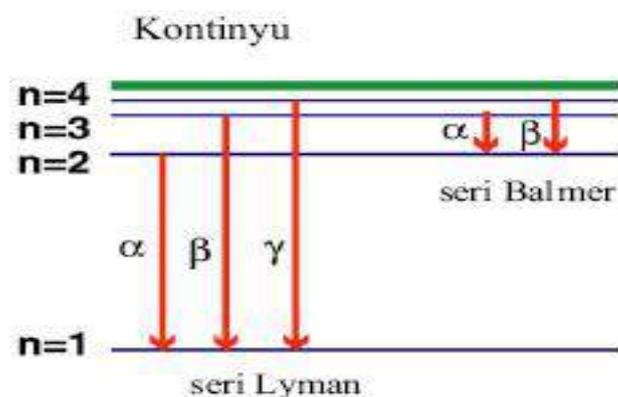
Spektrum garis yang paling sederhana adalah spektrum garis atom hidrogen. Balmer melakukan penelitian sehingga didapatkan deret Balmer untuk atom hidrogen.



Gambar 1.2. Spektrum cahaya polikromatik



Gambar 1.3. Spektrum garis



Gambar 1.4 Deret Balmer untuk atom hidrogen

### 1.3. Teori Bohr.

Seperti telah diketahui bahwa menurut Max Planck radiasi elektromagnetik bersifat diskontinyu atau dalam bentuk kuantum. Max Planck menurunkan persamaan untuk pernyataan tersebut sebagai berikut:

$$E = nh\nu$$

Keterangan:  
 n = bilangan bulat positif  
 h = tetapan Planck  
 ( $6,6,3.10^{-34}$  J.s)  
 $\nu$  = frekuensi

Pernyataan tersebut bertentangan dengan pandangan fisika klasik yang mengemukakan bahwa energi bersifat kontinyu. Untuk mengatasi perbedaan tersebut, Niels Bohr melakukan penelitian dan mencoba menjelaskan dengan pendekatan pemecahan spektrum garis hidrogen. Bohr menggunakan pendekatan Max Planck untuk menjelaskan spektrum garis hidrogen.

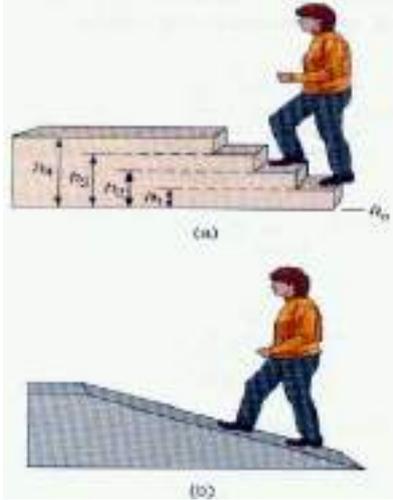
Beberapa hasil penelitian Bohr diantara adalah

- Elektron mengorbit pada lintasan tertentu dan dengan tingkat energi tertentu
- Lintasan orbit elektron berbentuk lingkaran dan disebut kulit
- Momentum sudut elektron yang mengorbit berharga kelipatan  $\frac{h}{2\pi}$ . Setiap elektron yang mengorbit mempunyai momentum sudut sebesar  $n\frac{h}{2\pi}$  dengan  $n=1, 2, 3, \dots$  yang merupakan bilangan bulat positif dan disebut sebagai bilangan kuantum utama.

Bilangan kuantum utama menyatakan kulit

Lintasan	Kulit	Bilangan kuantum (n)
1	K	n = 1
2	L	n = 2
3	M	n = 3
4	N	n = 4

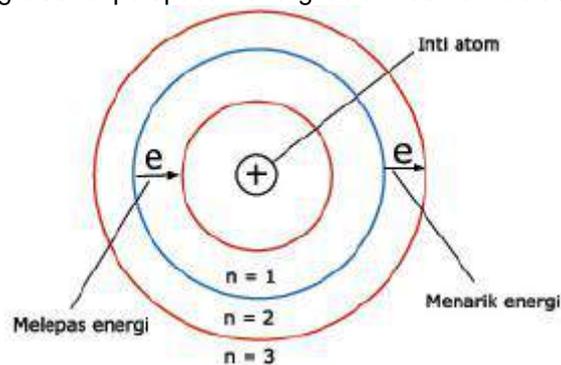
### Hubungan Lintasan, Kulit dan Bilangan Kuantum



Pendekatan energi oleh Max Planck dan fisika klasik Niels Bohr

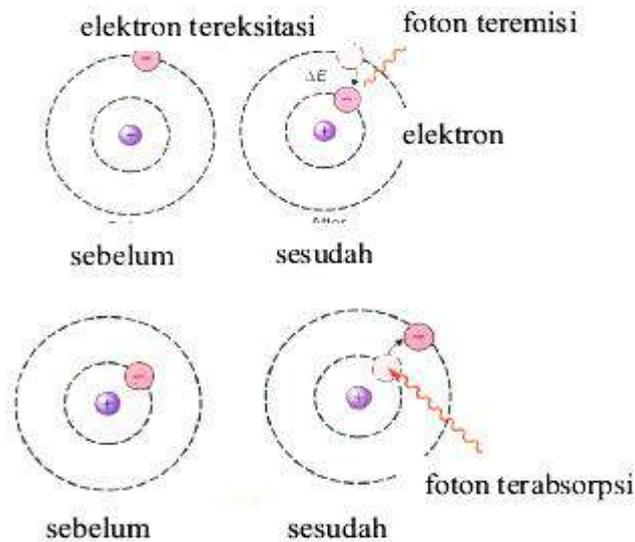
- Energi elektron berbanding terbalik dengan lintasan (kulit)
- Keadaan paling stabil adalah pada saat  $n = 1$  yakni ketika elektron memiliki energi paling minimal
- Elektron berada dalam keadaan stasioner, tidak memancarkan dan menyerap energi, ketika elektron mengorbit mengelilingi inti atom.

Apabila elektron berpindah dari tingkat energi rendah menuju tingkat energi tinggi maka energi akan diserap untuk melakukan proses tersebut. Elektron yang berpindah dari tingkat energi rendah menuju tingkat energi yang lebih tinggi menyebabkan elektron tereksitasi. Akan tetapi keadaan elektron tereksitasi ini tidak stabil sehingga elektron kembali dari tingkat energi tinggi menuju tingkat energi rendah yang disertai pelepasan energi dalam bentuk radiasi.



Gambar 1.5. Model atom Bohr

Teori Bohr berhasil menjelaskan spektrum garis atom hidrogen dan ion-ion berelektron tunggal seperti  ${}^2\text{He}^+$  dan  ${}^3\text{Li}^{2+}$ . Akan tetapi teori Bohr juga masih menunjukkan kelemahan yaitu tidak mampu menjelaskan spektrum garis atom berelektron banyak dan sifat spektrum garis dalam medan magnet serta tidak dapat menjelaskan garis-garis halus spektrum garis atom hidrogen.



Gambar 1. 6. Proses eksitasi dan emisi

Contoh soal:

Berapakah energi sinar laser dengan panjang gelombang 780nm.

$$780 \text{ nm} \times \frac{1 \text{ m}}{1 \times 10^9 \text{ nm}} = 7,8 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Jawab

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ Js} \times 2,998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}}{7,8 \times 10^{-7} \text{ m}} = 2,547 \times 10^{-19} \text{ J}$$

#### 1.4. Konfigurasi elektron.

Susunan elektron dalam atom dapat dijelaskan menggunakan konfigurasi elektron. Penyusunan elektron dalam atom didasarkan pada teori-teori berikut:

- Teori dualisme gelombang partikel yang dikemukakan oleh de Broglie pada tahun 1924. Teori ini menyatakan bahwa elektron dalam atom bersifat gelombang dan partikel.
- Azas ketidakpastian yang dikemukakan oleh Heisenberg pada tahun 1927. Teori ini menyatakan bahwa posisi dan momentum partikel tidak dapat ditentukan secara pasti dalam waktu bersamaan. Teori ini menyiratkan bahwa lintasan elektron tidak berbentuk lingkaran.
- Teori persamaan gelombang yang dikemukakan oleh Erwin Schrodinger. Teori ini dapat menerangkan pergerakan partikel-partikel mikroskopik termasuk elektron.

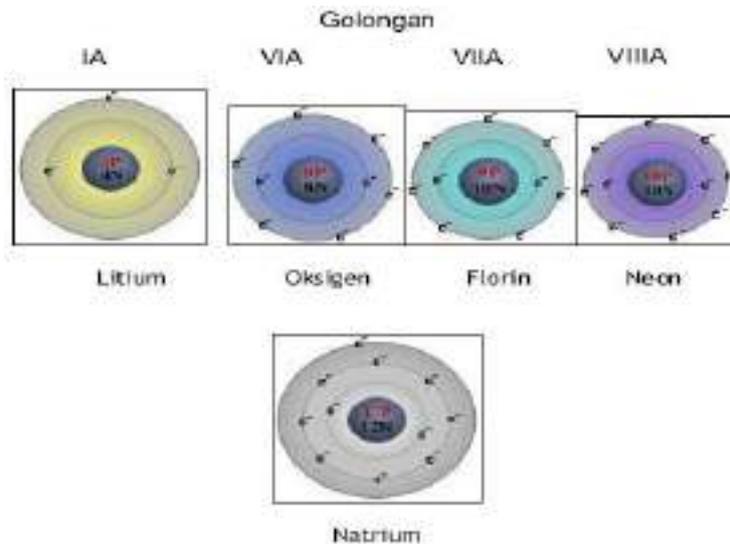
Azas ketidakpastian Heisenberg menyebabkan posisi elektron tidak dapat ditentukan dengan pasti demikian pula dengan orbit elektron dalam atom menurut mekanika kuantum. Walaupun orbit elektron tidak dapat ditentukan dengan pasti tetapi peluang untuk menemukan elektron pada posisi tertentu di sekitar inti masih mungkin untuk ditentukan. Orbital merupakan daerah disekitar inti dengan peluang terbesar untuk menemukan elektron. Kapasitas maksimal orbital untuk ditempati elektron sebesar 2 elektron. Orbital juga mempunyai energi yang khas bagi tiap-tiap elektron untuk menempatnya. Energi khas untuk tiap elektron ini sering disebut tingkat energi. Hanya elektron dengan energi yang cocok dapat menempati orbital tersebut. Sistem susunan elektron dalam atom dapat dilihat pada gambar berikut.

Kulit	Bilangan kuantum (n)	Daya tampung elektron maksimal
K	1	$2 \times 1^2 = 2$
L	2	$2 \times 2^2 = 8$
M	3	$2 \times 3^2 = 18$
N	4	$2 \times 4^2 = 32$
	...	...
	...	...
	...	...
	n	$2n^2$

#### 1.4.1. Susunan Bilangan Kuantum.

Jumlah maksimum elektron dalam kulit tertentu sebesar  $2n^2$  dengan n adalah nomor kulit. Pengisian elektron dimulai pada kulit dengan tingkat energi terendah yaitu kulit pertama atau kulit K yang dilanjutkan dengan kulit L, M, N dan seterusnya. Pengisian dilakukan dengan pengisian maksimum terlebih dahulu untuk tiap kulit. Apabila terdapat 18 elektron maka elektron akan mengisi kulit K sebanyak 2 yang dilanjutkan dengan pengisian kulit L sebanyak 8 elektron dan diakhiri dengan pengisian kulit L sebanyak 8 elektron.

Elektron valensi merupakan jumlah elektron yang terdapat pada kulit terluar suatu atom unsur. Ikatan kimia dapat terbentuk dengan memanfaatkan atau menggunakan elektron valensi sehingga elektron valensi dapat dikatakan merupakan penentu sifat kimia atom unsur.



Gambar 1. 7. Elektron valensi beberapa unsur periode 2 dan periode 3

### 1.5. Energi Elektron.

Seperti yang telah di uraikan di atas, bahwa elektron adalah merupakan bagian dari suatu atom. Istilah atom berasal dari kata Atomos (bahasa Yunani kuno) berarti yang pertama, tidak dapat di bagi.

#### 1.5.1 Teori Atom Demokritus

Demokritus (40 – 370 SM) menyatakan bahwa atom merupakan bagian terkecil dari benda.

#### 1.5.2 Teori Atom Dalton.

Dalton (1766-1844) mengemukakan dalam teorinya tentang atom suatu unsur, seperti berikut :

- Bahwa atom merupakan bagian terkecil suatu unsur yang tidak dapat di pecah / di bagi lagi.

- Bahwa atom suatu unsur tidak dapat di ubah menjadi atom unsur lain .
- Bahwa untuk atom / nomor massa, ukuran dan massa yang sama.
- Bahwa pada reaksi kimia massa atom sebelum dan sesudah reaksi adalah tetap , selain itu penggabungan dari atom – atom ini mengikuti suatu perbandingan yang tetap (tertentu).
- Bahwa bila 2 macam atom membentuk 2 senyawa atau lebih, maka perbandingan atom-atom yang sama pada senyawa tersebut merupakan perbandingan bilangan bulat yang sederhana, misal 3:2; 3:4 dll.

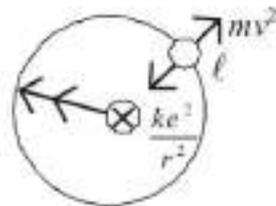
### 1.5.3. Model atom Thomson.

Setelah penemuan elektron yang merupakan bagian dari suatu atom pad tahun 1897, selain itu bahwa suatu atom dalam keadaan normal tidak bermuatan , di gunakan oleh Thomson untuk menyusun teori model atomnya sebagai berikut:

“bahwa atom terdiri dari muatan positif yang tersebar merata di seluruh isi atom dan elektron elektron juga tersebar di dalamnya, dimana muatan positif atom sama dengan muatan negatif dari elektronnya, sehingga atom menjadi netral”.

### 1.5.4 Model atom Rutherford.

Menurut Rutherford, elektron dalam sebuah atom bergerak mengelilingi intinya berbentuk lingkaran . Atom hidrogen (H) mempunyai satu elektron. Elektron ini bergerak mengelilingi intinya (berupa lingkaran) dan dapat di gambarkan sebagai berikut :



Gambar 1.8  
Bagan gaya tarik antara inti dan electron hidrogen

Energi Elektron yang ada di dalam lintasannya terdiri dari :

- Energi Potensial

$$E_p = - k \frac{e^2}{r} \dots\dots\dots (1-2)$$

- Energi Kinetik

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2} m v^2 \\ &= \frac{r}{2} \times \frac{m V^2}{r} \\ &= \frac{r}{2} \times k \frac{e^2}{r^2} \\ &= \frac{k}{2} \frac{e^2}{r} \dots\dots\dots (1-3) \end{aligned}$$

di mana : e = muatan elektron =  $1,60 \times 10^{-31}$  kg.  
r = jari-jari elektron terhadap intinya.

$$k = \text{konstante} = 9 \times 10^9 \frac{\text{Newton} \cdot m^2}{\text{Coulomb}^2}$$

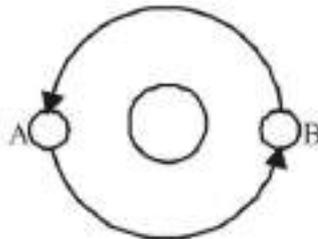
$$k \frac{e^2}{r^2} = \text{gaya tarik antara inti dan elektron}$$

$$\text{yang besarnya} = \text{gaya sentripetal} \frac{m V^2}{2}$$

Sehingga energi total elektron : 
$$E = -\frac{ke^2}{r} + \frac{ke^2}{2r}$$

$$= -\frac{ke^2}{2r} \dots\dots\dots (1-4)$$

Apabila r besarnya, maka harga E akan kecil. Oleh karena itu, harga E makin kecil apabila harga r makin besar.  
 Arus listrik diasumsikan sebagai elektron yang bergerak, dimana arahnya berlawanan dengan arah gerakan elektron tersebut.



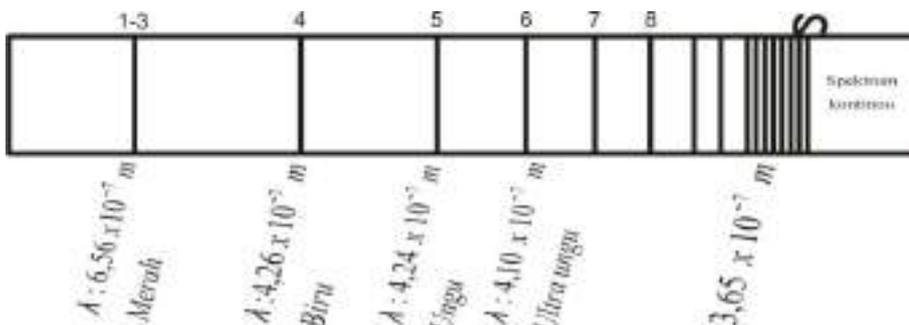
Gambar 1.9 Gerak elektron dan arah gaya magnet

Adanya arus listrik, maka akan menimbulkan medan magnet yang arahnya berubah-ubah , maksudnya arah medan pada waktu berada pada titik A (tegak lurus pada bidang gambar dan menuju ke kita), berbeda dengan pada waktu di titik B (tegak lurus pada bidang gambar dan meninggalkan kita)

Jadi akan terjadi medan magnet yang selalu berubah – ubah secara periodik. Elektron yang bergerak mengelilingi intinya ini akan menimbulkan gelombang – gelombang elektromagnetik. Dengan perkataan lain elektron – elektron ini akan memancarkan energi , maka energi elektron ini makin lama makin menyusut, sehingga jari –jari lintasannya akan mengecil. Jadi lintasan elektron tidak lagi merupakan lingkaran dengan jari –jari yang sama, melainkan merupakan putaran berpilin yang mendekati intinya. Sehingga dikatakan bahwa atom hidrogen tidak stabil. Hal ini merupakan keberatan yang pertama dari atom model Rutherford. Adapun keberatan kedua dapat di jelaskan sebagai berikut :

Bila elektron mempunyai lintasan yang makin menciut, maka waktu putaranyapun akan makin bertambah sedikit.

Sehingga frekwensi gelombang elektromagnetis yang di pancarkannya menjadi bermacam –macam. Jadi atom hidrogen bukanlah menunjukkan suatu spektrum garis tertentu, tetapi suatu spektrum yang kontinu (hal ini bertentangan dengan hasil pengamatan dengan spektrometer yang menunjukkan garis –garis khas dari atom Hidrogen..



Gambar 1.10 Spektrum garis hydrogen

**1.5.5. Model atom Bohr.**

Hasil Spektrometer menunjukkan bahwa spektrum Hidrogen terdiri dari deretan garis – garis yang terpisah –pisah menurut aturan tertentu yang di kenal sebagai deret Balmer.

Niels Bohr (1885 – 1962) menyusun model atom hidrogen di dasarkan pada Model atom Rutherford dan teori kuantum pada tahun 1913 berdasarkan 2 postulat ,yaitu :

1<sup>o</sup>. Elektron tidak dapat berputar di sekitar inti melalui setiap lintasan, akan tetapi hanya melalui lintasan – lintasan tertentu tanpa membebaskan energi. Dimana di dalam lintasan ini elektron mempunyai momentum angular sebesar

$$m V r = n \frac{h}{2\pi} \dots\dots\dots (1-5)$$

Dimana : n = bilangan kwatum  
h = konstante Plank

2<sup>o</sup>. Sebuah elektron akan menyerap atau memancarkan energi apabila bergerak dari lintasan yang lain. Energi ini berupa satu foton cahaya sebesar : h.f

$$(f = \text{frekwensi foton}) = (n_1 - n_2) \frac{h}{2\pi} \dots\dots\dots (1-6)$$

dimana :

n<sub>1</sub> = bilangan kuantum lintasan elektron awal

n<sub>2</sub> = bilangan kuantum lintasan elektron setelah perpindahan .

Jadi bila elektron bergerak dari litanan yang mempunyai energi tinggi berpindah ke lintasan yang mempunyai energi rendah foton tersebut dipancarkan, apabila terjadi sebaliknya maka foton tersebut akan di serap.

Dari persamaan (1-5) kelihatan bahwa besarnya energi akan berubah pada setiap lintasan

dengan  $\frac{h}{2\pi}$ , dan kecepatan adalah :

$$V = \frac{nh}{2\pi m r}, \text{ bila di kwadratkan menjadi :}$$

$$\left. \begin{aligned} V^2 &= \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m^2 r^2} \\ V^2 &= \frac{k e^2}{m r} \end{aligned} \right\} r = \frac{n^2}{m e^2 k} \left( \frac{h}{2\pi} \right)^2 \dots\dots\dots (1.7)$$

harga konstanta –konstanta adalah :

m = masa elektron =  $9 \times 10^{-31}$  Kg

e = muatan elektron =  $1,60 \times 10^{-19}$  Coulomb

k = konstanta besarnya =  $9 \times 10^9 \frac{\text{Newton } m^2}{\text{Coulumb}}$

h = konstanta yang besarnya =  $6,62 \times 10^{-34}$  Joule detik sehingga untuk harga :

n = 1 jari –jari litanan elektron

r =  $5,28 \times 10^{-11}$  m

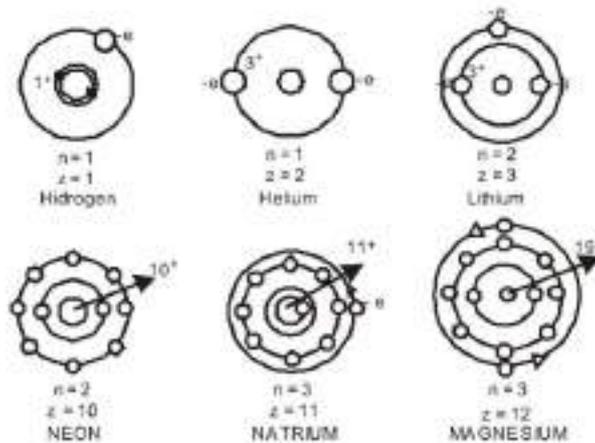
= 0,528 Angstrom

n = 2 r =  $4 \times 0,528$  Angstrom

= 2,112 Angstrom.

### 1.6. Susunan berkala unsur - unsur.

Bohr dan Stoner menyusun model – model atom berdasarkan pada pola atom Hidrogen. Tiap atom tersusun oleh inti atom yang bermuatan positif dengan satu atau beberapa electron disekitarnya yang bermuatan negative.



Gambar 1.11

Skema bor dan stoner untuk beberapa unsur susunan berkala

Hampir seluruh masa atom terdapat pada intinya. Masa suatu atom sama dengan bobot atom unsur tersebut di kalikan satuan masa atom. Nomor atom  $Z$  menunjukkan muatan positif inti dan jumlah electron yang mengelilinginya. Atom Lithium, dengan  $Z = 3$ , mempunyai 3 muatan positif pada inti dan 3 elektron pada kedua lintasannya. Atom Kalsium dengan  $Z = 19$ , mempunyai 19 muatan positif pada inti dan 19 elektron pada lintasannya – lintasannya.

Elektron – electron bergerak pada lintasannya. Menurut model atom Bhor lintasan – lintasan dengan  $n = 1, 2, 3, \dots$  dan seterusnya dinamakan kulit – kulit electron. Dimulai dengan Hidrogen, kulit atom berturut – turut mempunyai 1 elektron, 2 elektron pada Helium dan seterusnya.

Kulit electron yang pertama,  $n = 1$ , dikatakan telah penuh apabila mengandung 2 elektron. Kulit yang ke dua  $n = 2$ , telah penuh apabila mengandung 8 elektron, kulit yang ke tiga,  $n = 3$ , penuh bila terisi 13 elektron dan seterusnya. Bila kulit ke  $n$  telah terisi  $2n^2$  elektron, maka kulit tersebut telah penuh dan merupakan kulit yang tertutup. Jadi untuk kulit – kulit tertutup berlaku ketentuan : (Tabel 1.1)

Tabel 1.1 Jumlah Elektron tertutup dalam tiap kulit

Bilangan kuantum ( $n$ )	1	2	3	4 .... dst
Jumlah electron ( $2n^2$ )	2	8	16	32

Yang dimaksud dengan jumlah elektron pada tabel 1.1. diatas adalah untuk jumlah elektron pada kulit terluar bila dalam keadaan penuh/tertutup. Sedangkan bila setelah dijumlahkan elektron – elektronnya ternyata masih terdapat kelebihan electron, maka sisa elektron tersebut terletak pada kulit terluar (terbuka) dan elektron – elektron sisa inilah yang mudah keluar dari ikatan intinya bila mendapat pengaruh dari luar, hal ini dapat dilihat pada gambar 1.4. untuk atom unsur magnesium yang mempunyai 12 elektron, dari tabel 1.1. dapat dilihat :

- Pada kulit 1 ( $n = 1$ ) ada 2 elektron.
- Pada kulit 2 ( $n = 2$ ) ada 8 elektron

Total elektron pada kulit 1 dan 2 adalah 10 elektron ini berarti 2 elektron sisanya berada pada kulit ke 3. perincian jumlah elektron pada kulit – kulitnya tersebut diatas juga dapat dihitung dari terminology.

Berikut (tabel 1.2.) diberikan jumlah elektron atau nomer atom dari unsur – unsur atom :

Tabel 1.2. Tabel unsur – unsur atom

Nomer Atom	Unsur	Simbol	Berat Atom	Nomer Atom	Unsur	Simbol	Berat atom
1	Hidrogen	H	1,0080	23	Vanadium	V	50,95
2	Helium	He	4,003	24	Chromium	Cr	52,01
3	Lithium	Li	6,940	25	Manganese	Mn	54,93
4	Beryllium	Be	9,013	26	Besi	Fe	55,85
5	Boron	B	10,82	27	Cobalt	Co	58,94
6	Carbon	C	12,010	28	Nikel	Ni	58,69
7	Nitrogen	N	14,008	29	Tembaga	Cu	63,54
8	Oksigen	O	16,0000	30	Seng	Zn	65,38
9	Flourine	F	19,00	31	Gallium	Ga	69,72
10	Neon	Ne	20,183	32	Germanium	Ge	72,60
11	Sodium	Na	22,997	33	Arsenic	As	74,91
12	Magnesium	Mg	24,32	34	Selenium	Se	78,96
13	Alumunium	Al	26,98	35	Bromine	Br	79,916
14	Silicon	Si	28,09	36	Krypton	Kr	83,80
15	Phosphorus	P	30,975	37	Rubidium	Rb	85,48
16	Belerang	S	32,066	38	Strontium	Sr	87,63
17	Chlorine	Cl	35,457	39	Yttrium	Y	88,92
18	Argon	A	39,944	40	Zirconium	Zr	91,22
19	Potassium	K	39,100	41	Niobium	Nb	92,91
20	Calcium	Ca	40,08	42	Molybdenum	Mo	95,95
21	Seanidium	Sc	44,96	43	Technetium	Tc	[99]
22	Titanium	Ti	47,90	44	Ruthenium	Ru	101,7
Nomer Atom	Unsur	Symbol	Berat Atom	Nomer Atom	Unsur	Symbol	Berat Atom
45	Rhodium	Rh	102,91	74	Tungsten	W	183,92
46	Palladium	Pd	106,7	75	Rhenium	Re	186,31
47	Perak	Ag	107,880	76	Osmium	Os	190,2
48	Cadmium	Cd	112,41	77	Iridium	Ir	193,1
49	Indium	In	114,76	78	Platinum	Pt	195,23
50	Tin	Sn	118,70	79	Emas	Au	197,2
51	Antimony	Sb	121,76	80	Mercury	Hg	200,61
52	Tellurium	Te	127,61	81	Thallium	Tl	204,39
53	Iodine	I	126,91	82	Timah hitam	Pb	207,21
54	Xenon	Xe	131,3	83	Bismuth	Bi	209,00
55	Cesium	Cs	132,91	84	Polonium	Po	210
56	Barium	Ba	137,36	85	Astatine	At	[210]
57	Lanthanum	La	138,92	86	Radon	Rn	222
58	Cerium	Ce	140,13	87	Francium	Fr	[223]
59	Praseodymiu	Pr	140,92	88	Radium	Ra	226,05
60	m	Nd	144,27	89	Actinium	Ac	227
61	Neodymium	Pm	[145]	90	Thorium	Th	232,13
62	Promethium	Sm	150,43	91	Protactinium	Pa	231
63	Samarium	Eu	152,0	92	Uranium	U	238,07
64	Europium	Gd	156,9	93	Neptunium	Np	[237]
65	Gadolinium	Tb	159,2	94	Plutonium	Pu	[242]
66	Terbium	Dy	162,46	95	Americium	Am	[243]
67	Dysprosium	Ho	164,94	96	Curium	Cm	[243]
68	Holmium	Er	167,2	97	Berkelium	Bk	[245]
69	Erbium	Tm	169,4	98	Californium	Cf	[246]
70	Thulium	Yb	173,04	99	Einsteinium	Es	
71	Ytterbium	Lu	174,99	100	Fermium	Fm	
72	Lutetium	Hf	178,6	101	Nendelevium		
73	Hafnium	Ta	180,88	102	Nobelium		

## 1.7. MOLEKUL DAN IKATAN KIMIA

Molekul adalah suatu gabungan antara atom-atom dengan aturan tertentu dan merupakan bagian yang terkecil dari suatu zat, misalnya zat protein terdiri dari molekul-molekul asam amino dan asam amino terdiri dari atom C, H, O, N dsb.

Teori pembentukan molekul ada dua yaitu :

1. Teori ikatan valensi yaitu teori yang menyatakan atau menerangkan bahwa pembentukan molekul hanya ditentukan oleh elektron valensi (elektron pada kulit terluar saja).
2. Teori orbital molekul, bahwa molekul terbentuk merupakan orbital molekul, dimana terjadi dari orbital-orbital atomnya.

Atas dasar pengertian di atas, maka pembentukan molekul dari atomnya dan pembentukan senyawa dari molekul-molekulnya menjadi suatu pengertian yang dinamakan IKATAN KIMIA.

### 1.7.1. MACAM-MACAM IKATAN KIMIA.

#### 1. Ikatan Ion/Ikatan Heteropolar/Ikatan Elektrovalen

- a. Ikatan ini berdasarkan gaya tarik menarik elektrostatik antara atom-atom yang menjadi ion-ion yang berlawanan muatan.
- b. Ikatan ini disebabkan salah satu atom mengambil elektron menjadi ion negatif dan yang lain melepas elektron menjadi ion positif.
- c. Karena adanya ion negatif dan ion positif terjadi tarik menarik dan membentuk ikatan.
- d. Ikatan ini terjadi antara atom unsur-unsur yang bedabesarelektronegativitasnya.

**Elektronegativitas** adalah kekuatan atom dalam molekul untuk menarik elektron kepada dirinya misalnya :



Sifat umum persenyawaan Ikatan Ion / Ikatan Heteropolar / Ikatan Elektrovalen :

- a. Ikatan antara ion-ion adalah gaya tarik menarik antara 2 muatan listrik yang berlainan sehingga tidak ada ikatan yang erat antara ion-ionnya.
- b. Bila Kristal dari persenyawaan ion dilarutkan dalam air, maka ion-ion terpisah satu sama lain atau terdisosiasi.
- c. Bila pada larutan persenyawaan ion dimasukkan elektroda-elektroda yang bermuatan maka ion-ion akan bergerak ke arah elektroda yang bermuatan berlawanan dan larutan tersebut akan mempunyai sifat penghantar arus listrik.
- d. Persenyawaan ini merupakan zat padat yang sukar menguap.

Dua buah atom dapat membentuk ikatan elektrovalen, bila sebuah elektron dari salah satu atom dapat meninggalkan lintasannya dan masuk ke dalam lintasan atom yang lain. Dapat tidaknya terjadi peristiwa ini tergantung pada :

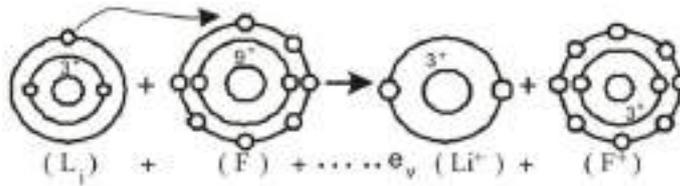
- a. Kekuatan medan listrik yang ditimbulkan oleh masing-masing inti pada sekelilingnya.
- b. Stabilitas daripada konfigurasi elektron pada kedua atom setelah terjadinya pemindahan elektron inti.

Kekuatan medan listrik dari inti terhadap sekelilingnya ini kecil apabila :

- a. Jari-jari ion adalah besar.
- b. Bila konfigurasi elektron menyelubungi inti terhadap sekelilingnya.

Pada atom – atom yang mempunyai kulit elektron tertutup misalnya atom H<sub>e</sub> dan N<sub>e</sub> sukar beraksi, sehingga dikatakan atom dalam keadaan stabil. Sebuah atom cenderung untuk memperoleh atau memberikan elektronnya sehingga akan mempunyai kulit yang tertutup dengan bekerjasama dengan atom – atom lain.

Atom Li yang mempunyai 3 elektron, 2 pada kulit yang pertama dan 1 pada kulit yang terluarnya, lebih senang untuk melepaskan 1 elektron yang terluar tersebut. Atom F dengan 9 elektron lebih senang untuk menangkap 1 elektron lagi. Dengan demikian keadaan atom ini dapat bekerjasama membentuk molekul L<sub>i</sub>F dengan memindahkan 1 elektron L<sub>i</sub> ke F. Atom L<sub>i</sub> akan menjadi ion L<sub>i</sub> 1<sup>+</sup> dan atom F akan menjadi ion F 1<sup>-</sup>. Ikatan yang timbul ini adalah ikatan elektron atau disebut juga ikatan ion, yang dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 1.12  
Perpindahan Elektron Pada  $I_1F$

Ion - ion yang terbentuk tarik – menarik secara elektrostatis.

## 2. Ikatan Kovalen atau Ikatan Ion

Pada ikatan tipe ini, maka atom-atom yang mengadakan ikatan saling memberikan sebuah elektron untuk dipergunakan bersama-sama sehingga diperoleh susunan elektron gas mulia (yaitu elektron paling luar setiap unsur itu 8 elektron).

Menurut jenis atomnya, ikatan ini terbagi :

- Ikatan kovalen yang homovalen yaitu ikatan kovalen yang terdiri dari 2 atom yang sama jenisnya. Misalnya :  $O_2$  ,  $Cl_2$  ,  $H_2$
- Ikatan kovalen yang heterovalen yaitu ikatan kovalen yang terdiri dari 2 atom atau lebih dimana atom-atomnya tidak sama. Misalnya :  $CH_4$  ,  $C_2H_6$  ,  $H_2O$

Sifat umum persenyawaan yang mempunyai ikatan kovalen :

- Umumnya berupa gas atau zat padat/cair yang mudah menguap
- Medan listrik yang ditimbulkan oleh molekul ini nol atau sangat kecil
- Persenyawaan kovalen umumnya sukar dalam air, hanya  $HCl$  dan  $NH_3$  yang mudah larut dalam air karena terjadi reaksi.

## 3. Ikatan Van der Waals

Ikatan ionic, kovalen dan logam merupakan ikatan yang kuat. Selain itu ada pula gaya tarik – menarik antar atom yang tidak berapa kuat yang dinamakan ikatan Van der Waals.

Kulit luar atom Helium merupakan kulit tertutup dengan dua elektron. Demikian pula kulit luar gas mulia lainnya seperti neon dan argon mempunyai kulit terluar tertutup dengan delapan elektron. Atom – atom gas mulia ini tidak dapat mengadakan ikatan secara kovalen maupun ikatan ion. Atom – atom ini mempunyai sedikit gaya tarik – menarik dan pada umumnya tetap bersifat monoton pada suhu biasa. Gas – gas ini baru akan mengembun pada suhu yang sangat rendah. Pengembunan ini merupakan bukti bahwa ada gaya tarik – menarik antar atom yang lemah.

Ikatan Van der Waals juga terjadi antar molekul, misalnya antara molekul – molekul metana  $CH_4$ . Pada suhu yang rendah zat ini dapat berbentuk padat.

Ikatan yang terjadi karena gaya tarik menarik yang sangat lemah antara molekul-molekul sejenis, hal ini berdasar gaya tarik inti atom terhadap elektron dari atom yang lain.

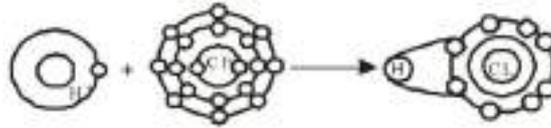
## 4. Ikatan Logam.

Ikatan yang terjadi pada kristal logam oleh atom – atomnya tidak dapat dikatakan ikatan ion atau kovalen. Pada ikatan ion atau kovalen, elektron terikat pada atom tertentu. Pada logam, kulit terluar atom hanya mempunyai sedikit elektron. Elektron – elektron tersebut mudah dilepaskan bebas dan bergerak bebas meninggalkan ion – ion logam yang bermuatan positif. Dengan demikian daya ikat yang terjadi seolah – olah terbentuk dari muatan positif ion yang diletakkan dalam kabut muatan negative yang homogen, ikatan seperti ini disebut ikatan logam.

Ikatan yang terdapat antara atom-atom logam, yang sedemikian kuatnya sehingga atom-atom logam tidak bergerak, namun elektron-elektron bebas bergerak antara atom-atom tersebut sehingga logam merupakan penghantar listrik yang baik.

## 5. Kombinasi ikatan – ikatan

Banyak zat yang atom – atomnya terbuat dengan cara lebih dari satu macam, pada hidrogen klorida  $HCl$  misalnya, elektron – elektron valensinya dapat terbagi berdasarkan 2 macam konfigurasi, yakni berdasarkan ikatan ionik dan ikatan kovalen.

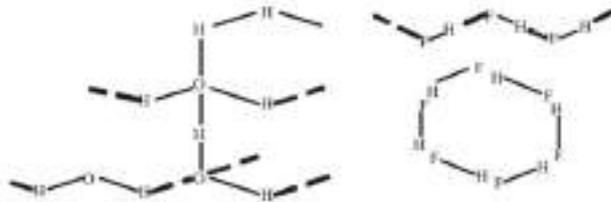


Gambar 1.13  
Dua alternative bentuk HCL

Kemungkinan tersebut tergantung kepada keadaan. Ikatan ionik lebih banyak terjadi bila HCl ada dalam bentuk larutan, sedangkan ikatan kovalen bila berbentuk gas. Dengan demikian ikatan seperti ini dapat dianggap sebagai kombinasi antara ikatan ion dan ikatan kovalen.

## 6. Ikatan hydrogen

Ikatan antara atom hydrogen dengan atom oksigen dari molekul air yang berlainan merupakan daya tarik – menarik antara molekul – molekul, sehingga berhak dinamakan ikatan, yakni ikatan hydrogen. Ikatan ini tidak hanya terdapat pada air , tetapi juga pada amoniak  $NH_3$  , Hidrogenflourida HF, dan seterusnya.



Gambar 1.14 Ikatan Hidrogen pada H2O dan HF

Ikatan hydrogen tidak hanya terjadi antara molekul – molekul yang serupa. Amoniak dan Amoniumsulfida sangat mudah larut dalam air karena ikatan hydrogen antara molekul – molekul yang berlainan.

### KIMIA.

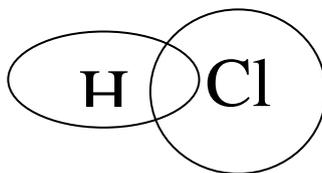
Ikatan Kovalen = Homopolar

Ikatan kovalen terjadi karena adanya pemakaian bersama elektron dari atom-atom yang membentuk ikatan. Pada umumnya ikatan kovalen terjadi antara atom-atom bukan logam yang mempunyai perbedaan elektronegativitas rendah atau nol, seperti misalnya  $H_2$  ,  $CH_4$  ,  $Cl_2$  ,  $N_2$  ,  $C_6H_6$  , HCl dan sebagainya.

Ikatan kovalen terbagi atas

#### 1. Ikatan Kovalen Polar

Atom-atom pembentuknya mempunyai gaya tarik yang tidak sama terhadap pasangan elektron persekutuan. Hal ini terjadi karena beda keelektronegatifan kedua atomnya.



Elektron persekutuan akan bergeser ke arah atom yang lebih elektronegatif akibatnya terjadi pemisahan kutub positif dan negatif.

Dalam senyawa HCl ini, Cl mempunyai keelektronegatifan yang lebih besar dari H sehingga pasangan elektron lebih tertarik ke arah Cl akibatnya H relatif lebih elektropositif sedangkan Cl relatif menjadi elektronegatif.

Pemisahan muatan ini menjadikan molekul itu bersifat polar dan memiliki momen dipole sebesar :

$$T = n \cdot d$$

dimana :

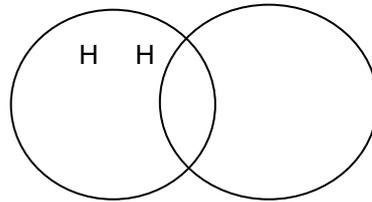
T = momen dipole

n = kelebihan muatan pada masing-masing atom

- 1 = jarak antara kedua inti atom
2. Ikatan Kovalen Non Polar

Titik muatan negatif elektron persekutuan berhimpit sehingga pada molekul pembentuknya tidak terjadi momen dipole dengan perkataan lain bahwa elektron persekutuan mendapat gaya tarik yang sama.

Contoh :



Kedua atom H mempunyai harga keelektronegatifan yang sama.



Karena arah tarikan simetris maka titik muatan negatif elektron persekutuan berhimpit. Contoh lain adalah senyawa  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Br}_2$  dan lain-lain.

3. Ikatan Kovalen Koordinasi/Koordinat/Dativ/Semipolar
- Adalah ikatan yang terbentuk dengan cara penggunaan bersama pasangan elektron yang berasal dari salah satu atom yang berkaitan [Pasangan Elektron Bebas (PEB)] sedangkan atom yang lain hanya menerima pasangan elektron yang digunakan bersama.
  - Pasangan elektron ikatan (PEI) yang menyatakan ikatan dativ digambarkan dengan tanda anak panah kecil yang arahnya dari atom donor menuju ekseptor pasangan elektron.
4. Ikatan Logam
- Adalah ikatan yang terbentuk akibat adanya gaya tarik-menarik yang terjadi antara muatan positif dari ion-ion logam dengan muatan negatif dari elektron-elektron yang bebas bergerak. Atom-atom logam dapat diibaratkan seperti bola pingpong yang terjejal rapat satu sama lain. Atom logam mempunyai sedikit elektron valensi, sehingga sangat mudah untuk dilepaskan dan membentuk ion positif. Maka dari itu kulit terluar atom logam relative longgar (terdapat banyak tempat kosong) sehingga elektron dapat berpindah dari satu atom ke atom lain. Mobilitas elektron dalam logam sedemikian bebas, sehingga elektron valensi logam mengalami **delokalisasi** yaitu suatu keadaan dimana elektron valensi tersebut tidak tetap posisinya pada satu atom tetapi senantiasa berpindah-pindah dari satu atom ke atom lain.
- Struktur logam menyebabkan sifat-sifat khas logam yaitu :
- Berupa zat padat pada suhu kamar, akibat adanya gaya tarik-menarik yang cukup kuat antara elektron valensi (dalam awan elektron) dengan ion positif logam.
  - Dapat ditempa (tidak rapuh), dapat dibengkokkan dan dapat direntangkan menjadi kawat. Hal ini akibat kuatnya ikatan logam sehingga atom-atom logam hanya bergeser sedangkan ikatannya tidak terputus.
  - Penghantar/konduktor listrik yang baik akibat adanya elektron valensi yang dapat bergerak bebas dan berpindah-pindah. Hal ini terjadi karena sebenarnya aliran listrik merupakan aliran elektron.

### 1.7.2. Polarisasi Ikatan Kovalen

Suatu ikatan kovalen disebut polar jika pasangan elektron ikatan (PEI) tertarik lebih kuat ke salah satu atom.

Contoh :

Molekul HCl, Meskipun atom H dan Cl sama-sama menarik pasangan elektron tetapi keelektronegatifan Cl lebih besar daripada atom H. Akibatnya atom Cl menarik pasangan elektron ikatan (PEI) lebih kuat daripada atom H sehingga letak PEI lebih dekat ke arah Cl (akibatnya terjadi semacam kutub dalam molekul HCl).

Jadi kepolaran suatu ikatan kovalen disebabkan oleh adanya perbedaan keelektronegatifan antara atom-atom yang berikatan. Sebaliknya, suatu ikatan kovalen dikatakan non polar (tidak ber kutub) jika PEI tertarik sama kuat ke semua atom.

#### Momen Dipol ( $\mu$ )

Adalah suatu besaran yang digunakan untuk menyatakan kepolaran suatu ikatan kovalen. Dirumuskan :

$$\mu = Q \times r$$

Dimana :

$\mu$  = momen dipole, satuannya debye (D)

Q = selisih muatan, satuannya coulomb (C)

r = jarak antara muatan positif dengan muatan negative, satuannya meter (m)

1 D =  $3,33 \times 10^{-30}$  cm

Tabel 1.3..Perbedaan antara Senyawa Ion dengan Senyawa Kovalen

No.	Sifat	Senyawa Ion	Senyawa Kovalen
1.	Titik didih	Tinggi	Rendah
2.	Titik leleh	Tinggi	Rendah
3.	Wujud	Padat pada suhu kamar	Padat, cair, gas pada suhu kamar
4.	Daya hantar listrik	Padat = isolator lelehan = konduktor Larutan = konduktor	Padat = isolator lelehan = isolator larutan = ada yang konduktor
5.	Kelarutan dalam air	Umumnya larut	Umumnya tidak larut
6.	Kelarutan dalam trikloroetana (CHCl <sub>3</sub> )	Tidak larut	Larut

### Pengecualian dan Kegagalan Aturan Oktet

#### 1. Pengecualian Aturan Oktet

- Senyawa yang tidak mencapai aturan oktet  
Meliputi senyawa kovalen biner sederhana dari Be, B dan Al yaitu atom-atom yang elektron valensinya kurang dari 4.  
Contoh : BeCl<sub>2</sub>, BCl<sub>3</sub> dan AlBr<sub>3</sub>
- Senyawa dengan jumlah elektron valensi ganjil  
Contoh : NO<sub>2</sub> mempunyai jumlah elektron valensi (5+6+6) = 17
- Senyawa dengan oktet berkembang  
Unsur-unsur periode 3 atau lebih dapat membentuk senyawa yang melampaui aturan oktet/lebih dari 8 elektron pada kulit terluar (karena kulit terluarnya M, N dst dapat menampung 18 elektron atau lebih).  
Contoh : PCl<sub>5</sub>, SF<sub>6</sub>, ClF<sub>3</sub>, IF<sub>7</sub> dan SbCl<sub>5</sub>.

#### 2. Kegagalan Aturan Oktet

Aturan oktet gagal meramalkan rumus kimia senyawa dari unsure transisi maupun post transisi.  
Contoh :  
atom Sn mempunyai 4 elektron valensi tetapi senyawanya lebih banyak dengan tingkat oksidasi +2  
atom Bi mempunyai 5 elektron valensi tetapi senyawanya lebih banyak dengan tingkat oksidasi +1 dan +3

### Penyimpangan dari Aturan Oktet dapat berupa :

- 1) Tidak mencapai oktet
- 2) Melampaui oktet (oktet berkembang)

### Penulisan Struktur Lewis

Langkah-langkahnya :

- 1) Semua elektron valensi harus muncul dalam struktur Lewis
- 2) Semua elektron dalam struktur Lewis umumnya berpasangan
- 3) Semua atom umumnya mencapai konfigurasi oktet (khususnya untuk H, duplet).
- 4) Kadang-kadang terdapat ikatan rangkap 2 atau 3 (umumnya ikatan rangkap 2 atau 3 hanya dibentuk oleh atom C, N, O, P dan S).

### Langkah alternatif : (syarat utama : kerangka molekul/ion sudah diketahui):

- 1) Hitung jumlah elektron valensi dari semua atom dalam molekul/ion.
- 2) Berikan masing-masing sepasang elektron untuk setiap ikatan.
- 3) Sisa elektron digunakan untuk membuat semua atom terminal mencapai oktet.

- 4) Tambahkan sisa elektron (jika masih ada) kepada atom pusat.
- 5) Jika atom pusat belum oktet, tarik PEB dari atom terminal untuk membentuk ikatan rangkap dengan atom pusat.

**Resonansi :**

- a. Suatu molekul atau ion tidak dapat dinyatakan hanya dengan satu struktur Lewis.
- b. Kemungkinan-kemungkinan struktur Lewis yang ekuivalen untuk suatu molekul atau ion disebut struktur resonansi.
- c. Dalam molekul SO<sub>2</sub> terdapat dua jenis ikatan yaitu satu ikatan tunggal (S-O) dan satu ikatan rangkap (S=O).
- d. Berdasarkan konsep resonansi, kedua ikatan dalam molekul SO<sub>2</sub> adalah ekuivalen.
- e. Dalam molekul SO<sub>2</sub> itu, ikatan rangkap tidak tetap antara atom S dengan salah satu dari dua atom O dalam molekul itu, tetapi silih berganti.
- f. Tidak satu pun di antara ke dua struktur di atas yang benar untuk SO<sub>2</sub>, yang benar adalah gabungan atau hibrid dari ke dua struktur resonansi tersebut.

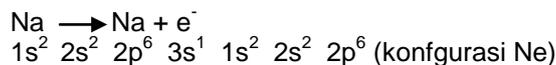
**1.7.3. Ikatan Ion = Elektrovalen = Heteropolar**

Ikatan ion biasanya terjadi antara atom-atom yang mudah melepaskan elektron (logam-logam golongan utama) dengan atom-atom yang mudah menerima elektron (terutama golongan VIA dengan VIIA). Makin besar perbedaan elektronegativitas antara atom-atom yang membentuk ikatan, maka atom yang terbentuk makin bersifat ionik.

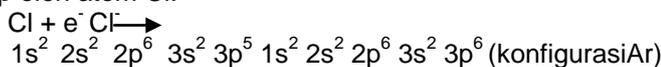
Pada umumnya unsure-unsur yang mudah membentuk ikatan ion adalah

- a. IA , VIIA atau VIA
- b. IIA , VIIA atau VIA
- c. Unsur transisi VIIIA atau VIA

Contoh :



Atom Cl (VIIA) mudah menerima elektron sehingga elektron yang dilepaskan oleh atom Na akan ditangkap oleh atom Cl.



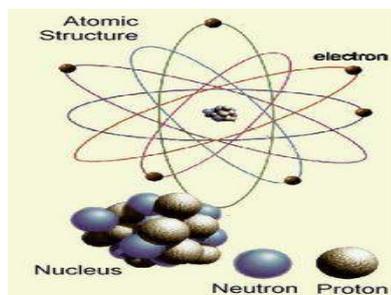
Antara ion-ion Na<sup>+</sup> dan Cl<sup>-</sup> terjadi gaya tarik menarik elektrostatik sehingga membentuk senyawa ion Na<sup>+</sup>Cl<sup>-</sup>

Contoh lain : CaCl<sub>2</sub> , MgBr<sub>2</sub> , BaO , FeS dan sebagainya.

Sifat-sifat senyawa ionic antara lain :

- a. Bersifat polar
- b. Larutannya dalam air menghantarkan arus listrik
- c. Titik lelehnya tinggi
- d. Lelehannya menghantarkan arus listrik
- e. Larut dalam pelarut-pelarut polar

**1.8. SEJARAH PERKEMBANGAN TEORI ATOM MENURUT PARA AHLI**



Pada awalnya gagasan tentang atom dikemukakan oleh Demokritus dan Leukipos. Mereka menganggap bahwa pem bagian materi bersifat diskontinu, jika suatu materi dibagi dan dibagi lagi

maka pada akhirnya akan diperoleh partikel terkecil yang tidak dapat dibagi lagi, partikel terkecil tersebut disebut atom (a = tidak ; tomos = terbagi). 2000 tahun kemudian (1803) barulah John Dalton menempatkan konsep atom secara kokoh menjadi konsep pokok keilmuan kimia. Menurut Dalton:

- Atom berupa bola yang amat kecil, tidak dapat dibelah, tidak dapat dimusnahkan dan tidak dapat diciptakan.
- Atom merupakan bagian terkecil dari suatu unsur
- Suatu unsur terdiri dari atom-atom yang identik
- Atom-atom suatu unsur berbeda dengan atom-atom dari unsur lain
- Dalam reaksi kimia, atom-atom tidak mengalami perubahan, yang berubah hanyalah susunan atom-atom.

Melalui teori atomnya Dalton dapat menjelaskan perilaku materi yang mengalami perubahan kimia ( Hukum dasar kimia ). Hukum Lavoisier ( Hukum kekekalan massa ) berbunyi:

"Pada reaksi kimia, massa zat sebelum dan setelah reaksi adalah sama"

Teori atom Dalton menjelaskan bahwa atom. Tidak dapat dimusnahkan atau diciptakan atau diubah menjadi atom lain. Dengan kata lain jenis dan jumlah atom sebelum dan sesudah reaksi sama (tidak ada perubahan massa)

Hukum Proust (Hukum Perbandingan Tetap) berbunyi:

"Dalam suatu senyawa perbandingan massa unsur-unsur penyusunnya selalu tetap" Menurut Dalton senyawa terbentuk dari penggabungan atom-atom dengan perbandingan tertentu. Karena atom-atom suatu unsur identik maka jika perbandingan jumlah atomnya tertentu maka perbandingan massanya pun tertentu

pula. Pada perkembangan selanjutnya, ditemukan berbagai fakta yang tidak dapat dijelaskan oleh teori atom Dalton, seperti masalah sifat listrik dari materi, spektrum unsur, masalah pembentukan ikatan kimia dan lain-lain sebagainya.

Pada tahun 1897 ditemukanlah adanya elektron dalam atom oleh Joseph John Thomson melalui percobaannya yang menggunakan tabung pengawa muatan. Menurut Thomson:

- Elektron merupakan komponen pokok penyusun materi
- Semua atom mengandung elektron
- Atom terdiri atas materi bermuatan positif dan elektron tersebar merata di dalamnya. Secara keseluruhan atom bersifat netral.

Model atom Thomson ini disebut juga model "plum-pudding" (roti kismis).

Kemudian pada tahun 1910 Ernest Rutherford bersama kedua orang asistennya, Hans Geiger dan Ernest Marsden, melakukan serangkaian percobaan untuk mengetahui lebih banyak tentang susunan atom. Mereka menembak lempeng logam tipis (emas) dengan partikel sinar alfa berenergi tinggi. Dari percobaan mereka menemukan bahwa sebagian besar partikel alfa dapat menembus logam tanpa mengalami pembelokan yang berarti, sebagian kecil mengalami pembelokan yang cukup besar, dan beberapa diantaranya dipantulkan. Penemuan ini spontan menyebabkan gugurnya teori atom Thomson.

Dari penemuannya Rutherford berasumsi:

- Atom terdiri dari inti yang bermuatan positif yang berada pada pusat atom. Massa atom terpusat pada inti.
- Elektron bergerak mengitari inti seperti halnya tatasurya.

Akan tetapi teori atom Rutherford ini tidak sesuai dengan teori dinami klasik yang menyatakan:

"Jika partikel bermuatan bergerak cepat maka partikel tersebut akan kehilangan energi dalam bentuk radiasi. Jadi, jika elektron bergerak mengelilingi inti, maka lama kelamaan elektron tersebut akan jatuh ke inti".

Karena belum bisa menjelaskan kestabilan elektron mengelilingi inti atom mengakibatkan teori atom Rutherford belum diterima pada saat itu.

Selanjutnya teori atom Rutherford disempurnakan oleh Neils Bohr. Dengan menerapkan teori kuantum Planck, Bohr menerangkan spektrum atom Hidrogen. Menurut Bohr:

- Elektron mengelilingi inti pada lintasan tertentu, yaitu lintasan yang memberikan

$$\frac{h}{2\pi}$$

momentum sudut sebesar  $n$ , dimana  $h$  = tetapan Planck =  $6,63 \times 10^{-34}$  J/s.

- Energi elektron dalam lintasan berbanding lurus dengan jarak lintasan dari inti. Makin jauh lintasan dari inti, makin tinggi tingkat energi lintasan. Selama elektron berada pada lintasannya elektron tidak melepas dan menyerap energi.
- Jika elektron menyerap energi maka elektron pindah ke lintasan yang tingkat energinya lebih tinggi. Dan jika elektron pindah dari lintasan dengan tingkat energi tinggi ke lintasan dengan tingkat energi rendah, maka elektron akan memancarkan energi dalam bentuk radiasi.

Teori atom Bohr ini menjadi penting karena telah dapat menggambarkan adanya tingkat tingkat energi dalam atom. Akan tetapi, teori atom Bohr tidak dapat menjelaskan spektrum atom berelektron banyak, efek Zeeman dan sifat keperiodikan unsur.

Untuk menerangkan kelemahan teori atom Bohr, maka lahirlah teori atom baru "teori atom mekanika kuantum" yang ditopang oleh hipotesa De Broglie dan Azas ketidak pastian Heisenberg.

Hipotesa De Broglie berbunyi:

"elektron dalam atom dapat dipandang sebagai partikel dan sebagai gelombang"

Azas ketidak pastian Heisenberg berbunyi:

"tidak mungkin menentukan kecepatan sekaligus posisi yang pasti dari elektron dalam ruang, yang dapat ditentukan adalah kebolehjadian menemukan elektron pada jarak tertentu dari inti"

Daerah kebolehjadian menemukan elektron disebut orbital. Pada tahun 1926, Erwin Schrodinger berhasil merumuskan persamaan gelombang yang menggambarkan orbital, dimana setiap orbital mempunyai bentuk dan energi tertentu. Satu orbital dapat ditempati oleh maksimal 2 elektron.

Kedudukan elektron dalam atom dijelaskan oleh 4 bilangan kuantum:

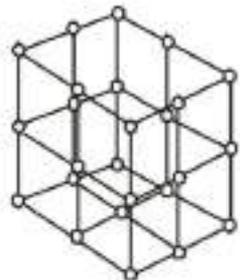
1. Bilangan kuantum utama (n) yang menyatakan tingkat energi
2. Bilangan kuantum azimuth (l) yang menyatakan orbital
3. Bilangan kuantum magnetik (m) yang menyatakan anorientasi orbital dalam ruang
4. Bilangan kuantum spin (s) yang menyatakan spin elektron.

### 1.9. Benda padat

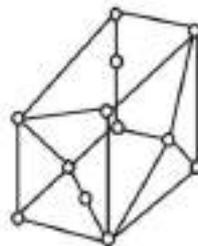
Benda padat sebagai molekul raksasa dimana setiap centimeter kubiknya mengandung sekitar  $10^{23}$  atom, tentunya akan memiliki berbagai sifat yang tergantung pada ikatan – ikatan electron, atom dan molekul yang membangunnya. Atom – atom pada suatu benda terikat satu dengan lainnya menurut berbagai cara seperti yang telah diuraikan di depan. Misal, garam dapur atom – atom Natrium dan Chlor yang terikat secara ionic. Intan terdiri atas atom – atom karbon yang saling terikat secara kovalen. Kawat tembaga terdiri atas atom – atom tembaga yang saling terikat menurut ikatan logam. Metan padat pada suhu yang rendah adalah merupakan kumpulan atom – atom Karbon dan hydrogen yang berpasangan secara kovalen dalam molekul  $CH_4$  dan kemudian molekul – molekul tersebut saling mengikat dengan ikatan Van der Waals.

Dengan menggunakan sinar cahaya yang mempunyai panjang gelombang antara 4000 sampai dengan 8000 Amstrong, kita tidak akan dapat mengamati bagaimana secara tepatnya atom – atom itu mengatur dirinya dalam molekul raksasa, sebab diperlukan jarak antara atom – atom dalam zat padat hanya beberapa amstrong saja.

Sinar X dengan panjang gelombang beberapa Angstrom, jika dikenakan pada zat padat kebanyakan dapat menghasilkan gambar pola – pola difraksi. Hal ini menunjukkan keteraturan letak atom – atom tersebut pada zat padat yang bersangkutan.



Gambar 1.15  
Struktur Kristal Garam Dapur (NaCl)

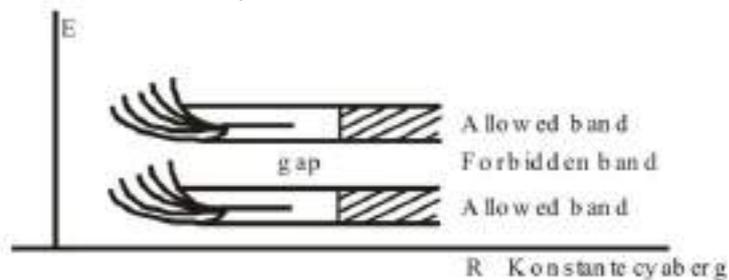


Gambar 1.16  
Struktur Kristal Intan

Ada juga zat padat yang tidak dapat memberikan pola difraksi yang jelas ketika disinari dengan sinar X, misalnya bahan gelas. Rupanya aturan atom – atom dalam bahan semacam ini tidak serapi bahan kristal. Bahan yang demikian ini dinamakan bahan AMORF (tanpa bentuk).

Selain itu sifat – sifat zat padat ternyata tidak semata – mata ditentukan oleh atom – atom pembentuknya. Kristal intan misalnya terdiri atas atom – atom karbon yang tersusun menurut aturan seperti yang dilukiskan pada gambar 1.10. bahan ini terkenal sangat keras dan berwarna bening, sehingga merupakan batu perhiasan yang sangat mahal harganya. Dilain pihak, arang juga terdiri atas atom – atom Karbon akan tetapi warnanya hitam, tidak keras dan mudah sekali dibuat sehingga harganya murah. Dari penyelidikan sinar X ternyata bahwa kristal arang memiliki struktur yang berlainan dengan struktur kristal intan. Hal ini menunjukkan bahwa betapa perubahan cara mengatur atom saja dapat merubah bahan padat. Saat ini sudah terdapat intan – intan buatan yang berasal dari arang dimana letak atom – atom karbonnya diatur sehingga menjadi aturan intan.

Benda padat dapat dilukiskan dalam bentuk kristal (gambar 1.9 dan gambar 1.10). karena letak atom – atom berdekatan dan beraturan, maka hal ini akan saling pengaruh mempengaruhi antara yang satu dengan yang lainnya. Sehingga dapat menyebabkan masing – masing energi level pecah menjadi beberapa level yang banyaknya tergantung dari jumlah atomnya. Dan apabila atomnya banyak sekali, maka masing – masing energi level tersebut akan pecah menjadi banyak sekali, dimana jarak (dalam energi) terhadap sesamanya kecil sekali, sehingga mereka dikatakan membentuk “Energi band atau pita energi”. Jadi pita energi menunjukkan tenaga yang ditempati oleh electron. Diantara energi band atau pita – pita energi tersebut mungkin terdapat gap atau celah tenaga /energi yang sama sekali tidak boleh ditempati oleh electron.



Gambar 1.17  
Diagram eita energi pada suatu benda

Keterangan gambar :

- 1°. Masing – masing pita energi menunjukkan bahwa disitu boleh terdapat electron (ada kquantum state electron) akan tetapi belum tentu ada. Pita energi yang demikian disebut **ALLOWED BAND**.
- 2°. Antara **ALLOWED BAND** dipisahkan oleh suatu celah atau gap. Didalam celah ini tidak boleh ada electron. Energi gap atau celah energi demikian ini disebut **FORBIDDEN BAND**.

Elektron yang terdapat didalam benda padat dapat dibedakan dalam 3 keadaan :

1o. Elektron bebas

Artinya elektron yang bebas bergerak dari satu atom keatom yang lain, yang dapat digambarkan sebagai kabut elektron yang mengelilingi atom. Benda padat yang demikian (yang mempunyai elektron bebas) mudah menyalurkan arus listrik.

2°. Elektron konduksi

Elektron konduksi adalah elektron bebas yang dihasilkan oleh Karena adanya pengaruh dari luar (dapat berbentuk panas dan sebagainya). Semikonduktor.



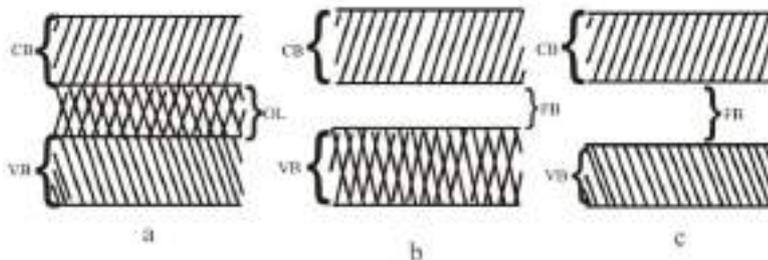
Gambar 1.18  
Proses terjadinya elektron konduksi

3°. Elektron tak bebas

Elektron ini tidak mudah lepas dari ikatannya, walaupun terdapat pengaruh dari luar. Sisanya elektron tak bebas ini terdapat pada benda padat (metal) dengan hantaran listrik yang kecil atau sering disebut juga bahan isolator.

Jadi suatu energi band (pita energi) selalu mengandung pita valensi dan allowed band yang berada di atasnya yang disebut pita konduksi.

Dengan mempelajari diagram pita energi ini, maka dapatlah ditentukan apakah suatu bahan termasuk dalam keluarga bahan penghantar, penyekat atau bahan semi konduktor.



Gambar 1.19

Diagram pita energy bahan konduktor(1.13a) Bahan semi konduktor(1.13b) dan Bahan isolator(1.13c)

Keterangan gambar :

- C.B : Conduction band (pita konduksi)
- F.B : Forbidden band (celah)
- V.B : Valensi band (pita energi)
- O.L : Over looping

Penjelasan :

1°. Bahan konduktor / penghantar

Pada diagram pita energi bahan konduktor (gambar diatas) tidak terdapat celah energi /forbidden band, dan bahkan terdapat overlooping (tumpang – tindih) antara pita konduksi dan pita valensi, sehingga dengan mudah elektron bebas dapat berpindah dari pita valensi kepita konduksi. Oleh karena itu bahan konduktor mempunyai banyak sekali pembawa muatan.

2°. Bahan semi konduktor

Energi gap pada bahan semi konduktor (gambar 1.12b) adalah kecil sekali, dengan adanya celah ini meskipun kecil maka elektron yang terdapat pada pita valensi tidak dapat berpindah kepita konduksi. Apabila temperaturnya dinaikkan, maka terdapat sejumlah kecil elektron pada pita valensi yang berpindah kepita konduksi (karena adanya pertambahan temperature akan menimbulkan tenaga thermis yang cukup untuk dapat memindahkan / mengeluarkan elektron dari ikatannya), dan bertugas sebagai pembawa muatan.

3°. Bahan isolator

Pada bahan isolator (gambar 1.12c) terdapat celah energi besar sekali, sehingga elektron yang terdapat pada pita valensi sulit untuk dapat berpindah kepita konduksi meskipun temperature dinaikkan. Oleh karena itu pada pita konduksi tidak terdapat pembawa muatan.

### 1.10. Klasifikasi

Berdasarkan penggunaannya, maka bahan listrik dapat dibedakan atas 6 (enam) macam yaitu :

1. Bahan penghantar (konduktor)
  - Bahan penghantar atau konduktor adalah bahan yang mempunyai sifat menghantarkan arus listrik dengan baik.
  - Dapat dipergunakan untuk memindahkan / menyalurkan energi listrik.
  - Tahanan listriknya tidak begitu besar.
  - Elektron bebasnya dapat bergerak cepat sekali, pada temperature kamar harganya sekitar 100 km/detik.
  - Bila bergerak tidak dalam pengaruh beda potensial, maka gerakannya tidak beraturan dan bila dalam pengaruh beda potensial, maka akan terjadi drift velocity (kecepatan mengalir) dari elektron dengan rumus :  
$$Vd = - \eta B \dots\dots\dots (1.8)$$

di mana :  $Vd$  : drift velocity (cm / dt)  
 $\eta$  : mobilitas  
 $B$  : kuat medan listrik (volt / cm)
  - Resistivitasnya sekitar  $10^{-2}$  ohm – cm
  -
2. Bahan isolator
  - Bahan isolator adalah bahan yang sulit menghantarkan arus listrik.
  - Elektron – elektron pada bahan ini sulit bergerak bebas, karena terikat oleh inti atomnya.
  - Tahanan listriknya besar sekali.
  - Resistivitasnya sekitar  $10^{12}$  ohm - cm
3. Bahan semi konduktor
  - Bahan semi konduktor adalah bahan yang pada keadaan biasa/temperature kamar sulit untuk menghantar /menyalurkan arus listrik, tetapi bila ada pengaruh dari luar sifatnya berubah menjadi mudah menghantar/menyalurkan arus listrik.
4. Bahan superkonduktor
  - Bahan super adalah bahan dimana pada temperature yang rendah  $\pm 4,5$  °K tahanan listriknya berubah (turun).
5. Bahan magnetic
  - Bahan magnetic adalah bahan yang dapat mempunyai sifat magnit.
  - Sifat magnit ini ada yang dari asalnya ada yang karena pengaruh lain.
  - Dapat menyalurkan garis - garis gaya magnit
6. Bahan struktur
  - Bahan struktur adalah bahan yang dipergunakan sebagai penunjang ada kaitannya dengan pemakaian aliran listrik.

Pertanyaan.

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan teori kuantum
2. Jelaskan proses terjadinya ikatan kovalen, ikatan hidrogen, ikatan logam
3. Terangkan jenis elektron dalam benda padat dengan diagram pita energi.
4. Bagaimana pengaruh kenaikan temperatur terhadap nilai tahanan
5. Jelaskan proses terbentuknya bahan semi konduktor,
6. Jelaskan Proses terjadinya breakdown
7. Ada berapa bahan padat menurut jenis nya
8. Apa yg di maksud dengan bahan struktur
9. Bagaimana proses terjadinya ikatan kovalen
10. Klasifikasi bahan menurut penggunaannya

## BAB II

### BAHAN PENGHANTAR / KONDUKTOR

Tujuan Instruksional : Mahasiswa dapat mengerti dan memahami tentang definisi dari bahan konduktor, elektron dalam benda padat, sifat elektron pada bahan konduktor, karakteristik bahan konduktor antara lain karakteristik listrik dan karakteristik mekanis bahan, yang meliputi nilai tahanan jenis bahan kuat hantar arus dan kuat hantar panas, gejala skin effect pada bahan konduktor, gejala korona, kemampuan bahan dalam menahan gaya tarikan dan gaya tekan, metode uji tarik pada bahan, mahasiswa dapat menghitung nilai tahanan dari konduktor berdasar kenaikan temperatur, memahami karakteristik bahan penghantar padat serta penggunaannya, mahasiswa memahami tentang bahan konduktor cair yang meliputi air raksa perak nitrat dan asam sulfat bahan konduktor gas yang meliputi gas argon, krypton dan fluorescent beserta penggunaannya.

#### 2.1. Umum

Definisi :

Bahan penghantar (konduktor) adalah suatu bahan listrik yang dipergunakan untuk membawa aliran listrik. Oleh karena itu sifat terpenting yang harus dipunyai oleh bahan penghantar / konduktor adalah sifat daya hantar listrik / electrical conductivity dan daya hantar panas / thermal conductivity yang tinggi. Daya hantar listrik yang tinggi berarti mempunyai tahanan jenis / resistivity yang rendah dimana besarnya tegangan tergantung pada ikatan / susunan atom / molekul / logam dari bahan penghantar / konduktor tersebut.

Perak mempunyai daya hantar listrik yang tinggi sekali dibandingkan dengan bahan penghantar yang lain, sedangkan tembaga berada sedikit dibawahnya. Akan tetapi berhubung harganya jauh lebih murah, maka tembaga lebih banyak dipakai. Kecuali pada hal – hal tertentu kadang – kadang perak juga dipakai.

Karena jumlah tembaga yang berada di alam ini/dibumi tidak melimpah ruah, sedangkan aluminium mempunyai daya hantar listrik yang cukup tinggi disamping itu juga ringan (beratnya), maka secara cepat aluminium banyak digunakan sebagai bahan konduktor.

Emas sebetulnya mempunyai daya hantar listrik yang lebih tinggi dari aluminium dan lebih rendah dibandingkan dengan perak atau tembaga, tetapi karena harganya yang mahal maka emas jarang dipakai sebagai bahan penghantar.

Selain daya hantar listrik dan daya hantar panas yang tinggi, maka factor – factor lain yang penting harus dipunyai oleh bahan penghantar didalam fungsinya menyalurkan arus listrik adalah :

- Sifat – sifat mekanis yang meliputi kekuatan tarik/tekan.
- Kemampuan menghantarkan arus listrik (current carrying capacity/allowable current).

#### 2.2. Karakteristik penghantar

##### 2.2.1. Karakteristik listrik

Tahanan : R

Definisi :

Tahanan listrik adalah suatu besaran yang menyatakan adanya hambatan dari bahan penghantar didalam menyalurkan arus listrik. Umumnya tahanan diberi notasi R atau r, dan mempunyai satuan ohm atau kadang – kadang ditulis dengan huruf Yunani  $\Omega$ .

Besarnya tahanan listrik dari bahan penghantar listrik tergantung pada :

- Tahanan jenisnya.
- Panjang saluran / penghantar
- Luas penampang saluran / penghantar
- Temperatur saluran / penghantar

Atau dapat dituliskan dengan persamaan :

$$R = \rho \frac{l}{A} \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana:

$R$  : tahanan penghantar pada temperatur tertentu ( $\Omega$ )

$\rho$  : tahanan jenis penghantar pada temperatur yang sama dengan temperatur penghantar  $\left(\frac{\Omega mm^2}{m}\right)$

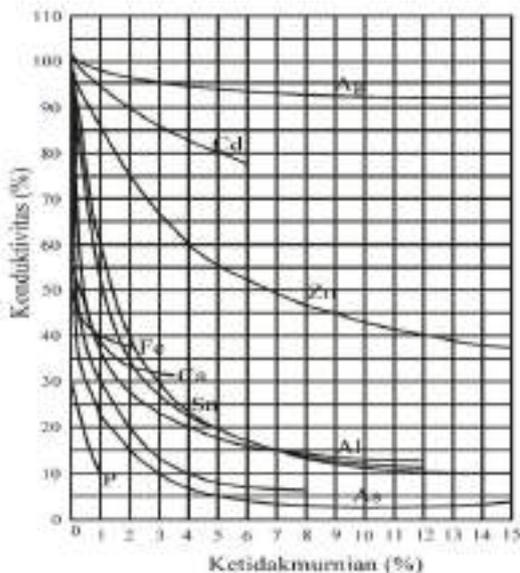
$l$  :  $\frac{l}{\Gamma}$

$\Gamma$  : konduktivitas penghantar  $\left(\frac{m}{\Omega mm^2}\right)$

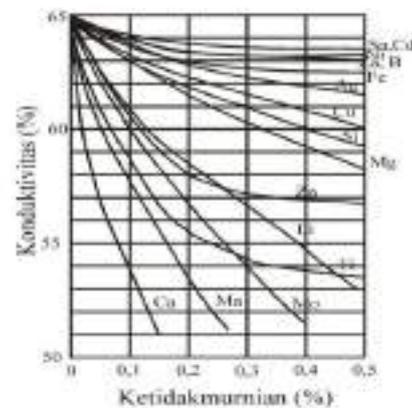
$l$  : panjang saluran / penghantar (m)

$A$  : luas penampang ( $mm^2$ )

Konduktivitas pada umumnya bertambah besar apabila kemurnian bahan makin tinggi dan berkurang bila jumlah campurannya bertambah. Hal ini dapat lebih jelas apabila kita lihat pada gambar 2.1 dan 2.2 dibawah ini untuk bahan Tembaga dan Aluminium.



Gambar 2.1  
Pengaruh ketidakmurnian terhadap Konduktivitas listrik untuk bahan tembaga



Gambar 2.2  
Pengaruh ketidakmurnian terhadap Konduktivitas listrik untuk aluminium

Daftar berikut ini adalah merupakan tabel tentang sifat listrik (tahanan jenis/resistivity) dari beberapa bahan listrik.

Tabel 2.1 Tahanan jenis dari beberapa bahan

Jenis Bahan	Tahanan jenis pada 0 °C ( $\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$ )	Tahanan jenis pada 20 °C ( $\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$ )
Alumunium	0,262	0,0287
Antimun	0,391	0,-
Brass	0,-	0,09
Bronze	0,178	-
Karbon (grafite)	8 – 13,9	-
Tembaga lunak	0,01589	0,01742
Tembaga keras	0,0160	0,0177
Germanium	890	-
Emas	0,0222	0,0236
Indium	0,0837	-
Besi murni	0,0885	0,0995
Baja ringan	0,118	-
Cast iron	0,978	-
Timah hitam	0,198	0,22
Magnesium	-	0,046
Air raksa	0,9407	0,9578
Nikel	-	0,09
Platina	0,0775	0,117
Silicon	0,-	0,58
Perak	0,0151	0,01629
Timah	0,105	0,115
Tungsten	0,0503	0,551
Seng	0,0538	0,0593

Tabel 2.2 Tahanan jenis dari bahan campuran

Jenis bahan	Tahanan jenis pada 0 °C ( $\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$ )	Tahanan jenis pada 20 °C ( $\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$ )
Konstantan ( $\text{Cu}_6\text{ONi}_4\text{O}$ )	0,49	0,49
Perak Jerman	0,331	0,338
Mangan	-	0,42
Metal monel	0,48	0,426
Nichrome	-	0,12

2.2.1.1 Pengaruh temperature pada tahanan suatu bahan penghantar listrik

Untuk bahan murni

Tahanan listrik suatu penghantar murni apabila temperaturnya dinaikkan, maka tahanan listriknya juga akan bertambah naik sesuai dengan persamaan

$$R_t = R_{t_0} \{1 + \alpha (t - t_0)\} \dots\dots\dots (2.2)$$

di mana:

$R_t$  = tahanan penghantar pada suhu  $t$  °C ( $\Omega$ )

$R_{t_0}$  = tahanan penghantar pada suhu  $t_0$  °C ( $\Omega$ )

$\alpha$  = koefisien suhu masakonstan

Apabila diperlukan perhitungan yang lebih teliti, digunakan persamaan yang menunjukkan ketergantungan bahan suhu :

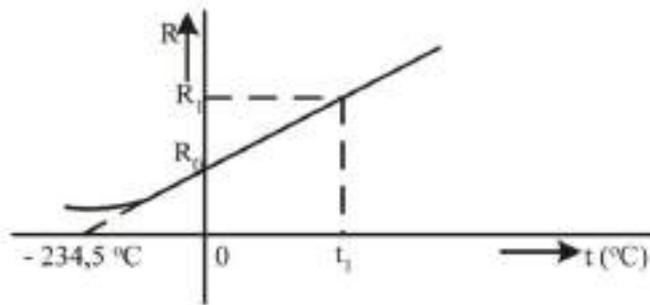
$$\alpha_1 = \frac{1}{1/\alpha \cdot (t - 20)} \dots\dots\dots(2.3)$$

di mana :

$\alpha$  : koefisien suhu pada temperatur s tan dart 20 °C

$\alpha_1$  : koefisien suhu pada temperatur t<sup>0</sup> C

Dari persamaan (2.2) diatas cukup jelas, bahwa harga pertambahan tahanan listrik berbanding lurus dengan pertambahan temperature pada “normal temperature range” seperti yang diperlihatkan pada gambar (2.3) dibawah :



Gambar 2.3  
Pertambahan harga tahanan listrik sebagai fungsi dari Waktu pada normal temperature range

Untuk bahan campuran :

Pertambahan harga tahanan listrik pada bahan campuran apabila suhu dinaikkan adalah relative kecil dan tidak teratur.

Pada bahan Eureka (campuran 69 % Cu dan 40 % Ni) serta Mangan, berhubung pertambahan harga tahanannya yang kecil sekali sering diabaikan.

Tahanan suatu konduktor ( penghantar) diberikan oleh :

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Dengan :  $\rho$  = resistivitas ( tahanan jenis bahan )

l = panjang kawat

A = luas penampang.

karena pada umumnya kawat- kawat penghantar terdiri dari kawat pilin ( stranded conductors), maka sebagai faktor koreksi untuk memperhitungkan pengaruh dari pilin tersebut panjang kawat dikalikan 1,02 ( 2 % faktor koreksi )

tahanan kawat berubah oleh temperatur dalam batas temperatur 10<sup>0</sup> Csampai 100<sup>0</sup>C, maka untuk kawat tembaga dan aluminium berlaku persamaan :

$$R_{t_2} = R_{t_1} [1 + \alpha_{t_2} (t_2 - t_1)]$$

Dengan : R<sub>t<sub>2</sub></sub> = tahanan pada temperatur 2

R<sub>t<sub>1</sub></sub> = tahanan pada temperatur 1

$\alpha_{t_1}$  = koefisien temperatur dari tahanan pada temperatur t<sub>1</sub> c<sup>0</sup>

Jadi ,

$$\frac{R_{t_2}}{R_{t_1}} = R_{t_1} [1 + \alpha_{t_1} (t_2 - t_1)]$$

$$\frac{R_{t_2}}{R_{t_1}} = \frac{T_0 + t_2}{T_0 + t_1}$$

Dimana :

$$\alpha_{t_1} = \frac{1}{T_0 + t_1}$$

$$\text{Atau : } T_0 = \frac{1}{\alpha_{t_1}} - t_1$$

Jelas kelihatan bahwa  $-T_0$  ialah temperature dimana tahanan kawat akan menjadi nol, bila persamaan linier yang sama berlaku untuk daerah temperatur itu. Dan bila ini benar maka  $-T_0$  adalah sama dengan temperature absolute  $-273^0$  C, untuk tembaga (Cu) yang mempunyai konduktivitas 100 % koefisien temperature dari tahanan pada suhu  $20^0$  C adalah

$$\alpha_{20} = 0,00393$$

$$\text{Atau : } T_0 = \left( \frac{1}{0,00393} \right) - 20 = 234,5^0 \text{ C}$$

Untuk konduktivitas lain dari tembaga  $\alpha$  berubah langsung dengan konduktivitasnya, jadi untuk konduktivitas 97,5 %

$$\alpha_{20} = 0,00383 \text{ dan } T_0 = 241,0^0 \text{ C}$$

Untuk aluminium (Al) dengan konduktivitas 61 %

$$\alpha_{20} = 0,00403 \text{ dan } T_0 = 228,1^0 \text{ C}$$

Pada table dibawah ini di berikan harga-harga untuk  $T_0$  dan  $\alpha$  untuk bahan konduktor standart.

Tabel 2.3. Harga-harga  $T_0$  dan  $\alpha$  untuk bahan konduktor standart

Material	$T_0$ °C	Koefisien temperatur dari tahanan x $10^{-3}$						
		$\alpha_0$	$\alpha_{20}$	$\alpha_{25}$	$\alpha_{50}$	$\alpha_{75}$	$\alpha_{90}$	$\alpha_{100}$
Cu 100 %	234,5	4,27	3,93	3,85	3,52	3,25	3,18	2,99
Cu 97,5 %	241,0	4,15	3,83	3,76	3,44	3,16	3,12	2,93
Al 61 %	228,1	4,38	4,03	3,95	3,60	3,30	3,25	3,05

Dalam table berikut ini di berikan resistivitas dari bahan konduktor standart untuk berbagai temperature.

Tabel 2.4 Resistivitas dari bahan konduktor standart untuk berbagai temperatur.

Material	Mikro -ohm - cm						
	$\rho_0$	$\rho_{20}$	$\rho_{25}$	$\rho_{30}$	$\rho_{75}$	$\rho_{80}$	$\rho_{100}$
Cu 100 %	1,58	1,72	1,75	1,92	2,09	2,12	2,26
Cu 97,5 %	1,63	1,77	1,80	1,97	2,14	2,18	2,31
Al 61 %	2,60	2,83	2,89	3,17	3,46	3,51	3,74

Tahanan arus searah yang diperoleh dari perhitungan diatas harus dikalikan dengan factor :

1,0 = untuk konduktor padat

1,01 + untuk konduktor pilin yang terdiri dari lapis (strand)

1,02 + untuk konduktor pilin yang lebih dari lapis

Contoh soal :

Hitunglah tahanan DC dari sebuah konduktor  $253 \text{ mm}^2$  ( 500.000 cm) dalam ohm per km pada  $25^0$  C, misalkan Cu 97,5 %

Dari table 2 dapat diperoleh :

$$\rho_{25} = 1,8 \text{ mikro-ohm-cm}$$

$$l = 1 \text{ km} = 10^5 \text{ cm}$$

$$A = 253 \text{ mm}^2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$$

$$R_{25} = \rho_{25} \frac{l}{A} = 1,8 \times 10^{-6} \times \frac{10^5}{253 \times 10^{-2}} = 0,0711 \text{ ohm/km}$$

Dengan memperhitungkan pengaruh lapisan ( biasanya konduktor terdiri dari lebih 3 lapis)

$$R_{25} = 1,02 \times 0,0711 = 0,0726 \text{ ohm/km}$$

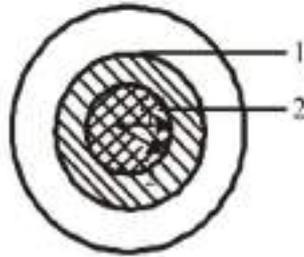
Contoh 2.

Tentukan tahanan DC dari ACSR  $403 \text{ mm}^2$  ( 795.000 cm ) pada  $25^0$  C, ACSR ialah konduktor aluminium yang mempunyai inti besi yang gunanya untuk mempertinggi kekuatan tarik, penampang konduktor ( $403 \text{ mm}^2$ ) tidak termasuk penampang baja, jadi hanya penampang Al saja, jadi untuk Al konduktivitas 61 % maka tahanan DC nya

$$R_{25} = 1,02 \times 2,89 \times 10^{-6} \times \frac{10^5}{403 \times 10^2} = 0,0731 \text{ ohm/km}$$

2.2.1.2 Pengaruh skin effect (efek kulit)

Definisi : Efek kulit adalah suatu gejala ketidaksamaan rata arus yang mengalir dalam suatu penghantar yang dialiri arus bolak – balik. Hal ini disebabkan karena adanya frekuensi pada arus yang mengalir tersebut.



Gambar 2.4  
Kerapatan arus pada penghantar dengan jari jari  $r_1$   
Dan  $r_2$  yang dialiri oleh arus bolak balik

Keterangan gambar :

1. Adalah besarnya arus yang mengalir dengan jari – jari :  $r_1$
2. Adalah besarnya arus yang mengalir dengan jari – jari :  $r_2$

Dengan adanya arus listrik bolak – balik yang mengalir pada penghantar, maka akan timbul fluks  $\phi$ . Fluks ini akan menimbulkan induksi diri (self inductantion) dan menghasilkan tegangan sebesar :

$$L = \frac{d\phi}{di} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$e = \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dari gambar 2.4 tampak bahwa besarnya arus yang mengalir pada 2 lebih besar dari pada 1, sehingga :

$$\left. \begin{array}{l} \phi_1 < \phi_2 \\ L_1 > L_2 \end{array} \right\} \rightarrow i :: \phi ; i_1 < i_2 \rightarrow \phi_1 < \phi_2$$

Menurut Maxwell dan Rayleigh, perbandingan antara tekanan skin effect terhadap tahanan arus searah :

$$\frac{Rs}{R} = 1 + \frac{1}{12} \left( \frac{m^2}{4} \right)^2 - \frac{1}{180} \left( \frac{m^2}{4} \right)^2 + \dots\dots\dots (2.6)$$

Sedangkan perbandingan antara reaktansi skin effect dan reaktansi arus searah :

$$\frac{A_s}{X} = 1 - \frac{1}{24} \left( \frac{m^2}{4} \right)^2 + \frac{12}{4320} \left( \frac{m^2}{4} \right)^2 - \dots \dots \dots (2.7)$$

di mana :

$R_s$  : tahanan skin effect ..... (ohm)

$R$  : tahanan arus searah ..... (ohm)

$A_s$  : reaktansi skin effect ..... (ohm)

$A$  : reaktansi arus searah ..... (ohm)

Dida

$$m : \sqrt{\frac{8\pi f l \times 10^{-9}}{R}} \dots \dots \dots (2.8)$$

$f$  : frekuensi ..... (hertz)

$l$  : panjang penghantar ..... (meter)

lam pemakaian praktisnya rumus – rumus diatas menjadi  
 $m : 0,3 f . A \dots \dots \dots (2.9)$

Sedangkan rumus  $R_s$  secara empiris adalah :

$$R_s : R \left\{ \frac{\left( l + \frac{m^2}{48} \right)^{\frac{1}{2}} + l}{2} \right\} \text{ untuk } m = 0 \text{ s/d } 3 \dots \dots \dots (2.10)$$

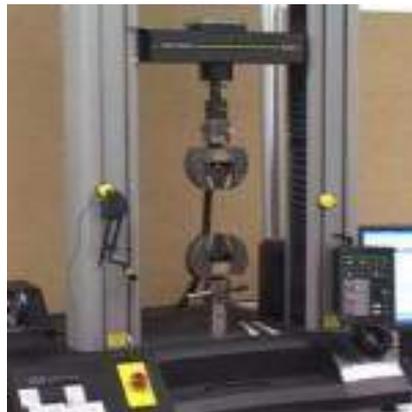
$$R_s : R \left( \frac{m}{2\sqrt{2}} + 0,26 \right) \text{ untuk } m \text{ diatas } 3 \dots \dots \dots (2.11)$$

Cara – cara untuk mengatasi pengaruh skin effect :

1. Frekuensi kerja direndahkan
2. Diameter penghantar diperkecil dengan menggunakan penghantar standart.

### 2.2.2. Karakteristik mekanis

Sifat mekanis bahan

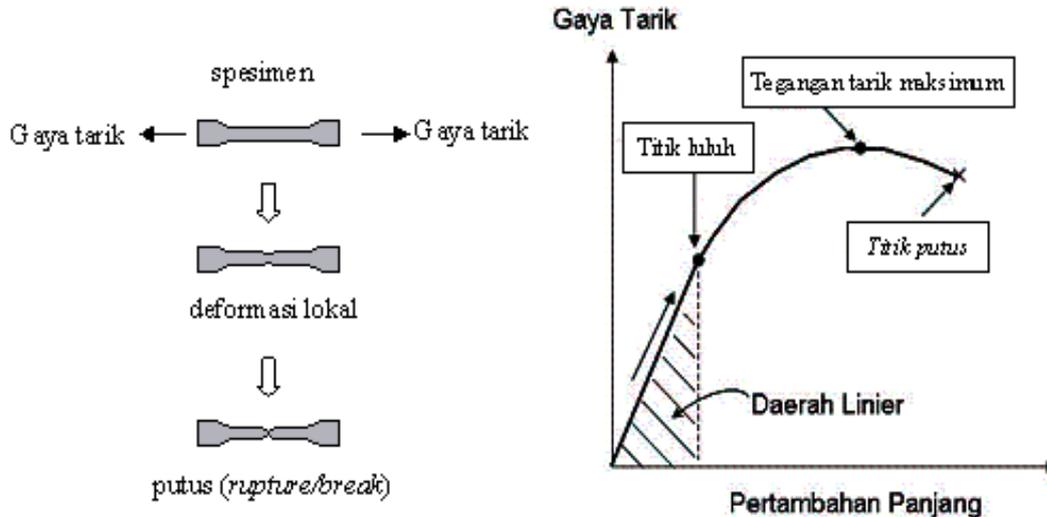


Untuk mengetahui sifat-sifat suatu bahan, tentu kita harus mengadakan pengujian terhadap bahan tersebut, ada empat jenis uji coba yang biasa dilakukan, yaitu uji tarik (*tensile test*), uji tekan (*compression test*), uji torsi (*torsion test*), dan uji geser (*shear test*). Dalam tulisan ini kita akan membahas tentang uji tarik dan sifat – sifat mekanik logam sifat mekanik logam yang didapatkan dari interpretasi hasil uji tarik.

Uji tarik mungkin adalah cara pengujian bahan yang paling mendasar. Pengujian ini sangat sederhana, tidak mahal dan sudah mengalami standarisasi di seluruh dunia, misalnya di Amerika dengan ASTM E8 dan Jepang dengan JIS 2241. Dengan menarik suatu bahan kita akan segera mengetahui bagaimana bahan tersebut bereaksi terhadap tenaga tarikan dan mengetahui sejauh mana material itu bertambah panjang. Alat eksperimen untuk uji tarik ini harus memiliki cengkeraman (*grip*) yang kuat dan kekakuan yang tinggi (*highly stiff*).

### 1. Mengapa melakukan Uji Tarik

Banyak hal yang dapat kita pelajari dari hasil uji tarik. Bila kita terus menarik suatu bahan (dalam hal ini suatu logam) sampai putus, kita akan mendapatkan profil tarikan yang lengkap yang berupa kurva seperti digambarkan pada gambar 2.5. Kurva ini menunjukkan hubungan antara gaya tarikan dengan perubahan panjang. Profil ini sangat diperlukan dalam desain yang memakai bahan tersebut.



Gambar. 2.5 Gambaran singkat uji tarik dan datanya

Biasanya yang menjadi fokus perhatian adalah kemampuan maksimum bahan tersebut dalam menahan beban. Kemampuan ini umumnya disebut "*Ultimate Tensile Strength*" disingkat dengan **UTS**, dalam bahasa Indonesia disebut tegangan tarik maksimum.

#### Hukum Hooke (*Hooke's Law*)

Untuk hampir semua logam, pada tahap sangat awal dari uji tarik, hubungan antara beban atau gaya yang diberikan berbanding lurus dengan perubahan panjang bahan tersebut. Ini disebut daerah linier atau *linear zone*. Di daerah ini, kurva pertambahan panjang vs beban mengikuti aturan Hooke sebagai berikut:

**Rasio tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) adalah konstan**

**Stress adalah beban dibagi luas penampang bahan dan**

**strain adalah : pertambahan panjang dibagi panjang awal bahan.**

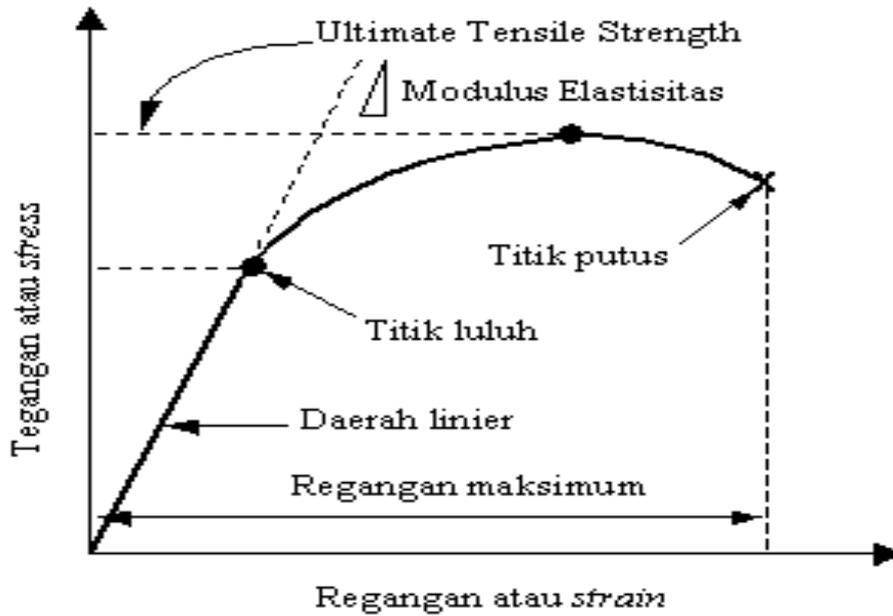
Stress:  $\sigma = F/A$       F: gaya tarikan, A: luas penampang

Strain:  $\epsilon = \Delta L/L$        $\Delta L$ : pertambahan panjang, L: panjang awal

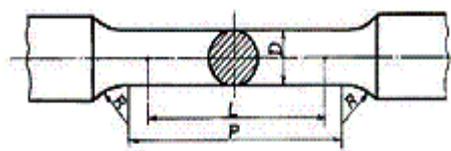
Hubungan antara stress dan strain dirumuskan:

$$E = \sigma / \epsilon$$

Untuk memudahkan pembahasan, Gambar.2.5 kita modifikasi sedikit dari hubungan antara gaya tarikan dan pertambahan panjang menjadi hubungan antara tegangan dan regangan (*stress vs strain*). Selanjutnya kita dapatkan Gambar.2.6, yang merupakan kurva standar ketika melakukan eksperimen uji tarik. *E* adalah gradien kurva dalam daerah linier, di mana perbandingan tegangan ( $\sigma$ ) dan regangan ( $\epsilon$ ) selalu tetap. *E* diberi nama "*Modulus Elastisitas*" atau "*Young Modulus*". Kurva yang menyatakan hubungan antara *strain* dan *stress* seperti ini kerap disingkat kurva SS (*SS curve*).



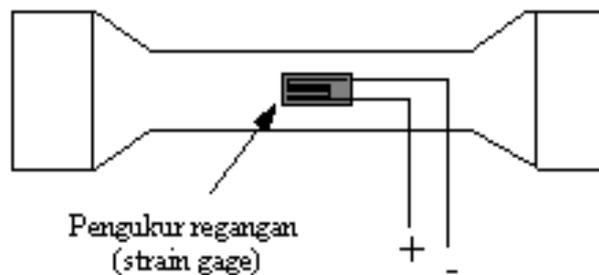
Gambar. 2.6 Kurva tegangan - regangan  
 Bentuk bahan yang diuji, untuk logam biasanya dibuat *spesimen* dengan dimensi seperti pada Gambar. 2.7 berikut.



Unit: mm

D	L	P	R
14	50	60	> 15

Gbr.2.7. Dimensi spesimen uji tarik (JIS Z2201).

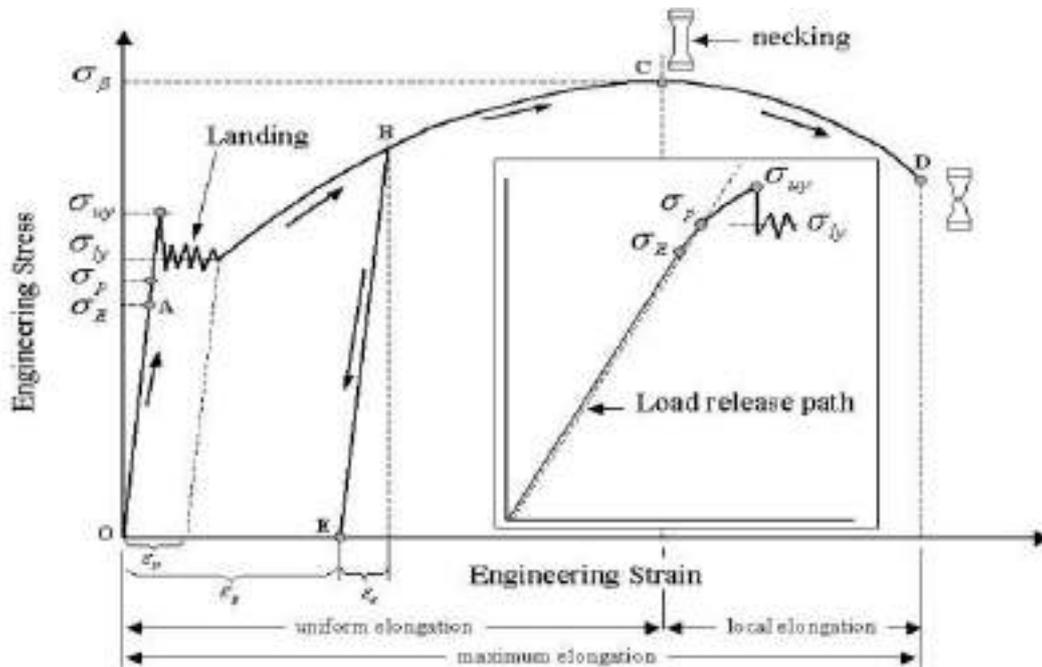


Gambar. 2.8 Ilustrasi pengukur regangan pada spesimen

Perubahan panjang dari spesimen dideteksi lewat pengukur regangan (*strain gage*) yang ditempelkan pada spesimen seperti diilustrasikan pada Gambar.2.8 Bila pengukur regangan ini mengalami perubahan panjang dan penampang, terjadi perubahan nilai hambatan listrik yang dibaca oleh detektor dan kemudian dikonversi menjadi perubahan regangan.

## 2. Detail profil uji tarik dan sifat mekanik logam.

Sekarang akan kita bahas profil data dari tensile test secara lebih detail. Untuk keperluan kebanyakan analisa teknik, data yang didapatkan dari uji tarik dapat digeneralisasi seperti pada Gambar. 2.9.



Gambar. 2.9 Profil data hasil uji tarik

Kita akan membahas istilah mengenai sifat-sifat mekanik bahan dengan berpedoman pada hasil uji tarik seperti pada Gambar.2.9. Asumsikan bahwa kita melakukan uji tarik mulai dari titik O sampai D sesuai dengan arah panah dalam gambar.

#### **Batas elastis $\sigma_E$ (elastic limit)**

Dalam Gambar. 2.9 dinyatakan dengan titik A. Bila sebuah bahan diberi beban sampai pada titik A, kemudian bebannya dihilangkan, maka bahan tersebut akan kembali ke kondisi semula (tepatnya *hampir kembali ke kondisi semula*) yaitu regangan “nol” pada titik O (lihat inset dalam Gambar 5). Tetapi bila beban ditarik sampai melewati titik A, hukum Hooke tidak lagi berlaku dan terdapat perubahan permanen dari bahan. Terdapat konvensi batas regangan permanen (*permanent strain*) sehingga masih disebut perubahan elastis yaitu kurang dari 0.03%, tetapi sebagian referensi menyebutkan 0.005%. Tidak ada standarisasi yang universal mengenai nilai ini.

#### **Batas proporsional $\sigma_p$ (proportional limit)**

Titik sampai di mana penerapan hukum Hook masih bisa ditolerir. Tidak ada standarisasi tentang nilai ini. Dalam praktek, biasanya batas proporsional sama dengan batas elastis.

#### **Deformasiplastis (plastic deformation)**

Yaitu perubahan bentuk yang tidak kembali ke keadaan semula. Pada Gambar 2.9 yaitu bila bahan ditarik sampai melewati batas proporsional dan mencapai daerah *landing*.

#### **Tegangan luluh atas $\sigma_{uy}$ (upper yield stress)**

Tegangan maksimum sebelum bahan memasuki fase daerah *landing* peralihan deformasielastis keplastis.

#### **Tegangan luluh bawah $\sigma_{ly}$ (lower yield stress)**

Tegangan rata-rata daerah *landing* sebelum benar-benar memasuki fase deformasiplastis, bila hanya disebutkan tegangan luluh (*yield stress*), maka yang dimaksud adalah tegangan ini.

#### **Regangan luluh $\epsilon_y$ (yield strain)**

Regangan permanen saat bahan akan memasuki fase deformasiplastis.

#### **Regangan elastis $\epsilon_e$ (elastic strain)**

Regangan yang diakibatkan perubahan elastis bahan. Pada saat beban dilepaskan regangan ini akan kembali keposisi semula.

**Regangan plastis  $\epsilon_p$  ( plastic strain)**

Regangan yang diakibatkan perubahan plastis. Pada saat beban dilepaskan regangan ini tetap tinggal sebagai perubahan permanen bahan.

**Regangan total (total strain)**

Merupakan gabungan regangan plastis dan regangan elastis,  $\epsilon_T = \epsilon_e + \epsilon_p$ . Perhatikan beban dengan arah OABE. Pada titik B, regangan yang ada adalah regangan total. Ketika beban dilepaskan, posisi regangan ada pada titik E dan besar regangan yang tinggal (OE) adalah regangan plastis.

**Tegangan tarik maksimum TTM (UTS, ultimate tensile strength).**

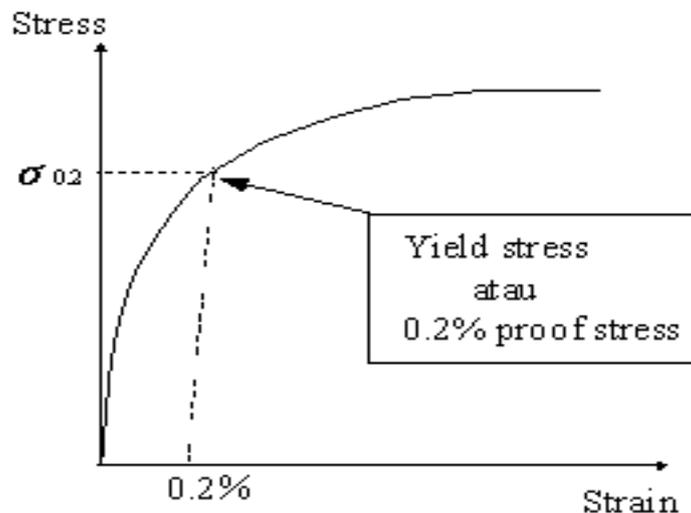
Pada Gambar 5 ditunjukkan dengan titik C ( $\sigma_B$ ), merupakan besar tegangan maksimum yang didapatkan dalam uji tarik.

**Kekuatanpatah (breaking strength)**

Pada Gambar 5 ditunjukkan dengan titik D, merupakan besar tegangan di mana bahan yang diuji putus atau patah.

**Tegangan luluh pada data tanpa batas jelas antara perubahan elastis dan plastis.**

Untuk hasil uji tarik yang tidak memiliki daerah linier dan landing yang jelas, tegangan luluh biasanya didefinisikan sebagai tegangan yang menghasilkan regangan permanen sebesar 0.2%, regangan ini disebut *offset - strain* (Gambar.2.10).



Gambar. 2.10. Penentuan tegangan luluh (*yield stress*) untuk kurva tanpa daerah linier. Perlu untuk diingat bahwa satuan SI untuk tegangan (*stress*) adalah Pa (Pascal,  $N/m^2$ ) dan strain adalah besaran tanpa satuan.

**3. Istilah lain**

Selanjutnya akan kita bahas beberapa istilah lain yang penting seputar interpretasi hasil uji tarik.

**Kelenturan ( ductility )**

Merupakan sifat mekanik bahan yang menunjukkan derajat deformasiplastis yang terjadi sebelum suatu bahan putus atau gagal pada uji tarik. Bahan disebut lentur (*ductile*) bila regangan plastis yang terjadi sebelum putus lebihdari 5%, bila kurang dari itu suatu bahan disebut getas (*brittle*).

**Derajat kelentingan ( resilience ).**

Derajat kelentingan didefinisikan sebagai kapasitas suatu bahan menyerap energi dalam fase perubahan elastis. Sering disebut dengan Modulus Kelentingan ( *Modulus of Resilience* ), dengan satuan *strain energy per unit volume* (Joule/ $m^3$  atau Pa). Dalam Gambar. 2.5, modulus kelentingan ditunjukkan oleh luas daerah yang diarsir.

**Derajat ketangguhan ( toughness )**

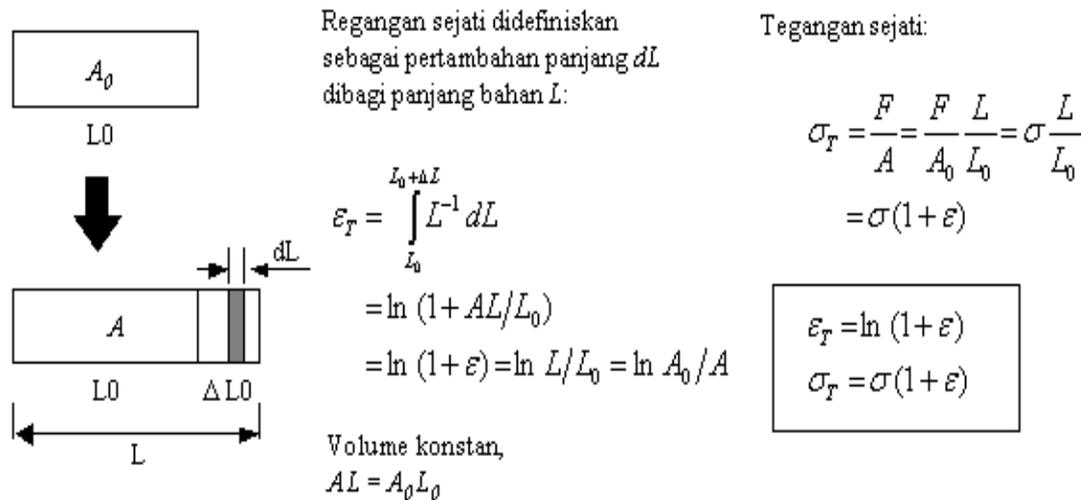
Kapasitas suatu bahan menyerap energi dalam fase plastis sampai bahan tersebut putus. Sering disebut dengan Modulus Ketangguhan (modulus of toughness). Dalam Gambar 2.9, modulus ketangguhan sama dengan luas daerah dibawah kurva OABCD.

**Pengerasan regang (strain hardening).**

Sifat kebanyakan logam yang ditandai dengan naiknya nilai tegangan berbanding regangan setelah memasuki fase plastis.

**Tegangan sejati , regangan sejati (true stress, true strain)**

Dalam beberapa kasus definisi tegangan dan regangan seperti yang telah dibahas di atas tidak dapat dipakai. Untuk itu dipakai definisi tegangan dan regangan sejati, yaitu tegangan dan regangan berdasarkan luas penampang bahan secara *real time*. Detail definisi tegangan dan regangan sejati ini dapat dilihat pada Gambar.2.11.



Gambar. 2.11. Tegangan dan regangan berdasarkan panjang bahan sebenarnya

Karakteristik mekanis dari suatu bahan listrik adalah suatu kemampuan yang harus dipunyai oleh bahan listrik terhadap segala gaya – gaya atau tekanan / tarikan yang ada padanya. Kekuatan tarik (tensile strength) sebuah penghantar listrik akan naik dengan bertambahnya jumlah campuran dan meningkatnya derajat penegerjaannya. Untuk kawat tembaga hard drawn berlaku persamaan kuat tarik sebagai berikut:

- Untuk kawat komponen :  $f = 47,1 - 1,1, 1 d$  (kg/mm<sup>2</sup>)
- Untuk kawat berlilit :  $T = 0,9 a N f$  ( kg ) ..... ( 2.12 )

Dimana :

- f : kuat tarik / luas penampang
- T : gaya tarik
- d : garis tengah kawat komponen (mm)
- a : luas penampang (mm<sup>2</sup>)
- N : jumlah kawat komponen dalam kawat lilit

Dengan adanya tarikan, maka pada kawat terjadi pemanjangan (elongation). Pemanjangan menunjukkan elastisitas bahan. Pemanjangan minimum dari kawat tembaga dinyatakan oleh :

$$S = 0,24 d + 0,24 (\%) \dots\dots\dots ( 2.13 )$$

**2.2.3. Kapasitas penyaluran arus dari penghantar**

Definisi : Kapasitas penyaluran arus atau kemampuan hantaran arus dari suatu penghantar adalah kemampuan dari pada penghantar untuk mengalirkan arus listrik yang melewatinya tanpa mengabaikan terjadinya perubahan bentuk atau terjadinya panas yang berlebihan. Kemampuan hantar arus dari suatu penghantar dibatasi oleh kenaikan suhu yang disebabkan oleh mengalirnya arus listrik dalam saluran / penghantar tersebut. Oleh karena karakteristik mekanis dari kawat dan sambungannya (mungkin penghantarnya disambung) dapat memburuk karena pemanasan, maka suhu 90 °C dianggap sebagai suhu yang berada diudara (overhead wire). Untuk kawat telanjang (bare), kemampuan hantaran arus dinyatakan oleh :

$$I = \frac{h_w + \left( h_r - \frac{W_s}{\theta} \right) \eta \pi d h_0}{R_{ac}} \quad (A) \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

di mana :

$$h_w = \frac{0,00572}{\left( 273 + T + \frac{\theta}{2} \right)^{0,123}} \sqrt{\frac{v}{d}} \quad (W / ^\circ C \text{ cm} ) \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

$$h_r = 0,000576 \frac{(273 + T + \theta)^4 - (273 + T)^4}{100 \theta} \quad (W / ^\circ C \text{ cm} ) \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana :

- $W_s$  : jumlah sinar matahari ( W/ °C cm<sup>2</sup> )
- : kenaikan suhu ( °C )
- : perbandingan dengan koefisien radiasi sebuah benda hitam (black body)
- d : garis tengah penghantar
- L : panjang penghantar
- $R_{ac}$  : tahanan listrik arus bolak – balik penghantar dengan panjang L pada suhu akhir ( )
- T : suhu sekeliling ( °C )
- V : kecepatan angin ( m/dt )
- I : arus ( A )

Daftar berikut adalah kemampuan hantar arus untuk berbagai saluran udara.

Tabel 2.5

Kemampuan hantaran arus untuk berbagai penghantar saluran udara .

Macam penghantar	Luas penampang ( cm <sup>2</sup> )	Kapasitas penyaluran arus penampang pada suhu sekeliling 40°C	
		Suhu maksimum untuk pembebanan kontinu 90 °C	Suhu yang toleransikan maksimum 100 °C
Hard Down Copper standart cable	200	660	740
	150	540	610
	100	420	470
	75	350	395
	55	290	320
	38	225	245
	22	160	175
	Alluminium Cable Steel Reinforced	610	1070
520		960	1090
410		840	940
330		720	810
240		600	670
160		460	510
120		390	440
300		620	695
Hard Drawn alluminium Alloy Stranded cable	240	535	600
	150	395	450
	100	310	345
	55	215	235
	38	165	185
	150	420	475
	100	420	475
	70	265	285
55	230	250	

**Tabel 2.6**  
**Ketentuan – ketentuan teknik yang lain dari bahan**

Jenis bahan	Berat Jenis	Titik cair ( °C )
Air raksa	13,56	- 38,9
Alumunium	2,56	660
Ontimon	6,62	630
Baja	7,8	1535
Besi tuang	6,24 s/d 7,24	-
Bismuth	4,85	271
Duralium	2,8	-
Emas		1063
Cadmium	8,65	320
Chrom	6,8	1615
Konstantan	8,9	-
Cobalt	8,42	1450
Mangaan	7,4	1260
Magnesium	1,74	651
Nikel	8,9	1455
Perak	105	960
Perunggu	7,4 s/d 8,9	900
Platina	21,5	1774
Seng	6,85 s/d 7,2	420
Tembaga	8,9	1083
Timbel	11,35	330
Timah putih	7,3	232
Wolffarm	19,1	3400

#### 2.2.4. Daya hantar panas

Daya hantar panas menunjukkan jumlah panas yang melalui lapisan bahan tiap satuan waktu, diperhitungkan dalam satuan  $\frac{k\text{ kal}}{m\text{ jam}} \text{ derajat}$ .

Hal ini penting diketahui agar bahan – bahan penghantar tidak menjadi rusak, misalnya dalam pemakaian mesin listrik, kabel dan sebagainya.

#### 2.2.5. Timbulnya daya elektromotoris termo

Sifat ini penting sekali pada kontak yang terbuat dari dua bahan yang berlainan, karena pada aliran arus akan bangkit gaya elektromotoris bila dalam keadaan panas. Daya elektromotoris ini dapat tinggi, sehingga dapat menyimpangkan pengukuran arus atau tegangan yang sangat kecil.

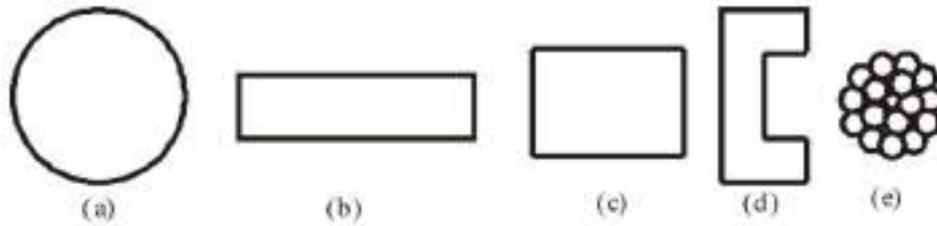
Besarnya perbedaan tegangan yang terbangkit, tergantung dari sifat – sifat kedua bahan tersebut dan sebanding dengan perbedaan suhunya.

Daya elektromotoris termo adalah daya elektromotoris yang terbangkit oleh perbedaan panas.

#### 2.2.6. Jenis – jenis penampang bahan penghantar

Penampang bahan penghantar, umumnya dibuat dalam berbagai bentuk sesuai dengan tujuan penggunaannya. Bentuk – bentuk itu adalah :

- Bulat
- Segi empat tipis / pelat
- Kanal
- Stranded
- Sesuai dengan pesanan



Gambar 2.12  
Penampang bahan penghantar (a) bulat, (b) segi empat, (c) segi empat tebal (d) kanal, (e) Stranded

### 2.3. Bahan konduktor

Menurut bentuknya bahan konduktor dapat dibagi dalam 3 jenis yakni :

- Bahan konduktor berbentuk padat
- Bahan konduktor berbentuk cair
- Bahan konduktor berbentuk gas

#### 2.3.1. Bahan konduktor berbentuk padat.

Bahan konduktor berbentuk padat yang sering dijumpai dipasaran adalah tembaga (Cu) dan Aluminium (Al), akan tetapi untuk memperoleh suatu karakteristik / sifat yang lebih baik bahan konduktor tersebut tidak dibuat murni, akan tetapi dicampur atau digabungkan dengan bahan yang lain, untuk jelasnya berikut akan dijelaskan satu persatu.

##### 2.3.1.1. Tembaga ( Cu )

###### 2.3.1.1.1. Sifat listrik

Sifat listrik bahan tembaga dapat dilihat pada tabel 2.5

###### 2.3.1.1.2. Sifat fisik

- Daya hantar panasnya : 0,93 cal/cm sec. °C
- Daya tahan terhadap korosi besar, hanya pada suhu yang tinggi korosi baru terjadi
- Titik leburnya : 1800 °C

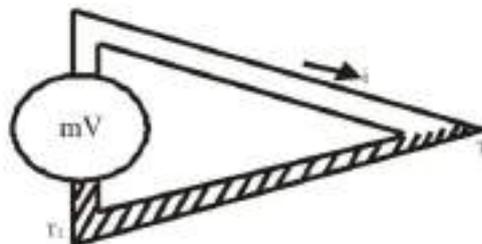
###### 2.3.1.1.3. Sifat mekanis

- Kekuatan tariknya cukup tinggi :  $\pm 40$  s/d  $50 \text{ kg/mm}^2$  dan bila temperaturnya naik harganya akan turun.
- Tidak rapuh, artinya dapat dibengkokkan akan tetapi tidak mudah putus.

###### 2.3.1.1.4. Penggunaan

Karena sifat – sifat yang dijumpai seperti yang telah disebut diatas, antara lain adalah:

- Sebagai bahan penghantar pada inti kabel, kumparan – kumparan transformator, generator, dan motor, jaringan tenaga listrik, mengingat bahan tembaga mempunyai konduktivitas yang cukup tinggi.
- Dapat dipakai sebagai alat/bahan pengukur temperature (pada termokopel).



Gambar 2.13  
Termo kopel pada bahan CU dan NI

Pada keadaan bahan : Cu 56 % dan Ni 44 %, maka termoelektrik emf yang terjadi cukup besar. Bila perbedaan temperaturnya makin tinggi, maka termoelektrik emf yang terjadi juga semakin besar.

- Tembaga keras (hard drawn cooper) digunakan apabila dikehendaki tegangan tariknya yang tinggi, kekerasan dan daya tahan terhadap kerusakan.
- Tembaga lunak (Annealed cooper) digunakan apabila dipentingkan sifat lenturnya.
- Bahan tembaga yang dicampur dengan bahan yang lain. Meskipun akan menjadikan tahanan jenisnya akan turun, dipasaran kita jumpai juga bahan tembaga yang dicampur dengan bahan yang lain. Hal ini dilakukan supaya sifat – sifat mekanisnya dapat digunakan sesuai dengan kebutuhan atau keperluan yang lain.

Misalnya dicampur dengan bahan :

- Timah (Sn), akan membentuk perunggu / brenze, hal ini dilakukan agar umur kabel dapat tahan lama.
- Nikel (Ni), akan membentuk konstantan, digunakan untuk memperbaiki kekuatan tarik, ketahanan terhadap korosi dan ketahanan terhadap panas.
- Mangan (Mn) digunakan untuk memperbaiki kekuatan tarik dan ketahanan terhadap terjadinya keausan.
- Alumunium (Al) digunakan sebagai konduktor dengan keuntungan lebih tahan terhadap factor korosi.

### 2.3.1.2. Alumunium (Al)

#### 2.3.1.2.1. Sifat listrik

Sifat listrik bahan alumunium dapat dilihat pada tabel 2.5

#### 2.3.1.2.2. Sifat fisik

- Daya hantar panasnya : cal/cm sec. °C
- Daya tahan terhadap korosi besar, hanya pada suhu yang tinggi korosi baru terjadi
- Titik leburnya : 660 °C
- Berat jenisnya ± 3 kali lebih kecil dari berat jenis tembaga.

#### 2.3.1.2.3. Sifat mekanis

- Kekuatan tariknya lebih rendah dari pada bahan tembaga ± 15 – 23 kg/mm<sup>2</sup> dan bila dipanaskan besarnya akan turun.
- Alumunium mudah dikerjakan, dibengkokkan dan dipres.

#### 2.3.1.2.4. Penggunaan

Mengingat sifat – sifat diatas, Alumunium banyak dipakai, misalnya :

- Sebagai penutup pada transistor karena mempunyai daya hantar panas yang cukup tinggi.
- Sebagai bahan pelindung pada bagian – bagian peralatan yang tidak boleh terkena gelombang electromagnet.
- Sebagai kawat jaringan dan inti/urat kabel, karena beratnya yang ringan serta mempunyai daya hantar listrik yang cukup tinggi.
- Daya hantar listriknya ± 65 % dari tembaga pada kemurnian 99,5 %.
- Karena sifat tegangan tariknya yang tidak terlalu besar, maka perlu diperkuat dengan kawat/bahan baja (baja mempunyai tegangan tarik ± 46 s/d 50 kg/mm<sup>2</sup> , sehingga diperoleh kawat ACSR : Alumunium Cable Steel Reinforced.
- Apabila diinginkan diperoleh karakteristik /kemampuan hantaran arus yang sama dengan bahan tembaga, maka diantaranya harus lebih besar yakni sekitar ± 150 s/d 160 % nya.
- Sebagai bahan yang digunakan pada kumparan transformator arus, rotor motor, karena pengerjaannya yang mudah.
- Alumunium yang dicampur dengan bahan lain.

Alumunium alloy (campuran) adalah merupakan campuran antara alumunium dengan bahan tegangan lain dengan maksud agar mempunyai tegangan tarik yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan bahan murni.

Adapun bahan – bahan yang sering digunakan sebagai campuran adalah :

- Tembaga (Cu)
- Silikon (Si)
- Mangan (Mn)
- Magnesium (Mg)

### 2.3.1.3. Bahan – bahan yang lain ( campuran )

#### 2.3.1.3.1. Kuningan/ brass

Kuningan adalah merupakan bahan campuran antara tembaga (Cu) dan seng (Zn).

Sifat – sifatnya :

- Warnanya kuning.
- Tegangan tariknya antara 23 s/d 40 kg/mm<sup>2</sup>
- Harganya lebih murah bila dibandingkan dengan tembaga murni.
- Mudah dikerjakan, meskipun dalam keadaan dingin.
- Kurang cocok bila dipakai dalam udara terbuka karena keretakan akibat tarik tekan.
- Titik leburnya  $\pm 200$  °C

Penggunaan kuningan :

- Karena mempunyai konduktivitas yang rendah, kurang tepat bila dipakai sebagai penghantar listrik.
- Digunakan sebagai saluran gelombang (Wave guide) UHF microwave.

#### 2.3.1.3.2. Perunggu/bronze

Perunggu merupakan bahan campuran antara Tembaga dan Timah. Selain itu sering juga dicampur dengan bahan – bahan lain, seperti fosfor, silicon.

Sifat – sifat perunggu :

- Tahanan jenisnya lebih rendah dari pada bahan kuningan.

Penggunaan perunggu :

- Kawat perunggu dipakai untuk hantaran – hantaran halus, misalnya untuk kawat telegraf.
- Digunakan terutama pada alat – alat agar tahan terhadap korosi.

#### 2.3.1.4. Kawat penghantar sebagai penyalur aliran listrik.

Sebagai penyalur aliran listrik, kawat penghantar dapat dibedakan :

1. Berdasarkan susunan kawat/penampang
  - kawat pejal
  - kawat berlilit (stranded)
  - kawat berongga (hollow)
  - kawat serabut
2. Berdasarkan susunan materialnya :
  - kawat dari logam murni
  - kawat dari logam campuran
  - kawat dari logam paduan

##### 2.3.1.4.1. Berdasarkan susunan kawat/penampang

###### a. Kawat pejal

Kawat pejal pada umumnya dibuat sampai dengan penampang 10 mm<sup>2</sup> , sedangkan bila dikehendaki lebih dari itu digunakan susunan kawat berlilit. Dibuat susunan demikian dengan maksud agar lebih fleksibel dalam pengerjaan/pemasangan

###### b. Kawat berlilit

Maksud dibuatnya kawat penghantar berlilit adalah :

- Agar lebih fleksibel dalam pengerjaan / pemasangannya.
- Untuk mengurangi skin effect
- Lebih mudah / sederhana dalam pembuatan di pabrik.

Pada umumnya kawat berlilit ini, dibuat mulai 7 sampai dengan 61 buah kawat tunggal.

###### c. kawat berongga (hollow)

Kawat dengan bentuk / penampang berongga dibuat dengan tujuan :

- Garis tengah luar konduktor yang lebih besar, sehingga pendinginannya lebih sempurna.
- Masih didapatkan kekuatan.

Dengan maksud pembuatan seperti yang disebut diatas, maka kawat dengan penampang berongga banyak digunakan untuk rel/busbar pada gardu induk.

###### d. Kawat serabut

Kawat ini dibuat dengan maksud agar lebih mudah dalam pemasangannya khususnya yang dipakai sebagai inti kabel.

Selain itu juga untuk mengatasi masalah skin effect serta untuk memperbaiki / mengurangi interferensi bila penghantarnya dibebani.

#### 2.3.1.4.2. Berdasarkan susunan material

##### a. Kawat dari logam murni

Kawat penghantar yang dibuat dari logam murni dimaksudkan agar diperoleh tahanan jenis listriknya yang rendah. Untuk mengatasi masalah kekuatan mekanisnya, maka dibuat sebagai berikut :

- agar diperoleh kekerasan yang tinggi, maka logamnya dikeraskan.
- Agar diperoleh sifat yang fleksibel dalam pemasangannya, maka logamnya dibuat lunak. (soft).

##### b. Kawat dari logam campuran (alloy)

Kawat penghantar yang dibuat dari logam campuran dimaksudkan agar diperoleh kekuatan mekanis yang lebih baik, khususnya untuk logam yang mempunyai kekuatan mekanis yang rendah tetapi tahanan listriknya yang cukup rendah serta jumlahnya dibumi yang cukup banyak. Contoh yang tepat adalah Alumunium sebagai bahan pencampur umumnya dipakai tembaga, silicon, mangaan, magnesium.

##### c. Kawat dari logam paduan

Kawat ini dibuat agar diperoleh kekuatan mekanis yang tinggi. Misalnya paduan antara Alumunium dengan baja. Alumunium sebagai bahan penghantarnya dan baja untuk mengatasi masalah mekaniknya (kekuatan tarik). Umpama ACSR (alumunium cabel steel reinforced). Kawat jenis ini banyak dipakai pada jaringan transmisi tenaga listrik.

#### 2.3.1.5. Corona

Dengan semakin tingginya tegangan listrik yang dioperasikan pada jaringan transmisi (tingginya tegangan listrik ini dimaksudkan agar diperoleh rugi – rugi atau loses yang rendah), maka hal ini akan menimbulkan beberapa masalah. Adapun masalah tersebut antara lain :

- Gejala corona yang dapat mengakibatkan gangguan pada komunikasi radio (radio interference) dan daya hilang (power loss) corona.
- Masalah isolasi pada kawat penghantar.
- Masalah isolasi pada peralatan listrik.
- Masalah keamanan terhadap manusia, hewan atau barang.

##### 2.3.1.5.1. Proses terjadinya corona

Bila dua kawat penghantar yang sejajar (berpenampang kecil bila dibandingkan dengan jarak antara kedua kawat tersebut) diberi tegangan listrik bolak – balik, maka corona dapat terjadi. Dan bila tegangan listrik tersebut dinaikkan secara bertahap, maka coronapun akan naik pula secara bertahap.

##### a. Secara visuil

Pertama – tama kawat kelihatan bercahaya, mengeluarkan suara mendesis (hissing) dan berbau Ozone, warna cahaya yang telah disebut diatas makin lama makin jelas kelihatan, cahayanya semakin bertambah terang apabila tegangan listriknya dinaikkan terus dan akhirnya akan terjadi busur api.

Corona mengeluarkan panas dengan terjadinya power loss dan hal ini dapat diukur dengan wattmeter. Bila konduktor disekitar konduktor tersebut dalam keadaan lembab, maka corona ini dapat menghasilkan asam nitrigin (Nitrous acid), hal ini akan mempengaruhi power loss dengan perkataan lain kehilangan dayanya menjadi lebih besar.

Apabila tegangan listriknya merupakan tegangan searah, pada kawat positif korona kelihatan dalam bentuk cahaya yang menyala pada seluruh permukaan kawat, sedangkan untuk kawat nolnya corona hanya terjadi pada tempat – tempat tertentu saja.

##### b. Secara fisis

Corona terjadi karena adanya ionisasi dalam udara disekitar konduktor, selain itu molekul udara disekitar penghantar kehilangan electron. Dengan lepasnya elektron dan ionisasi ini dan disertai adanya medan listrik maka elektron – elektron bebas tersebut akan mengalami gaya, sehingga gerakannya dipercepat. Akibatnya elektron ini akan mengalami tabrakan dengan molekul lain sehingga akan menimbulkan ion – ion dan elektron – elektron baru.

Proses ini berjalan terus – menerus, sehingga jumlah ion dan elektron bebas menjadi berlipat ganda (bila gradient potensialnya cukup besar). Ionisasi udara dapat mengakibatkan redistribusi tegangan dan bila redistribusi ini besarnya sedemikian rupa sehingga gradient udara (tegangan listrik) diantara dua kawat lebih besar dari pada gradient udara normal, maka akan terjadi loncatan bunga api. Bila hanya sebagian saja dari pada udara antara dua kawat terionisasikan, maka corona merupakan sampul yang mengelilingi kawat tersebut. Gradient tegangan listrik seragam yang dapat menimbulkan ionisasi kumulatif diudara normal (25 °C, 760 mm Hg) adalah 30 KV/Cm.

2.3.1.5.2. Hilang daya Corona

Hilang daya corona menurut PEEK dinyatakan sebagai berikut :

$$Pk = \frac{244}{\delta} (f + 25) V \frac{r}{D} (V - Vd)^2 10^{-5} \text{ KW / Km} \dots\dots\dots (2.17)$$

di mana :

$$\delta = \frac{0,392b}{273 + T}$$

$f = \text{Frekuensi} \quad (C / s)$

$r = \text{Jari – jari kawat} \quad (Cm)$

$D = \text{Jarak antar kawat} \quad (Cm)$

$V = \text{Tegangan fase} \quad (KV \text{ rms})$

$Vd = \text{Tegangan disruptiskritis} \quad (KV \text{ rms})$

Rumus (2.11) diatas berlaku untuk satu konduktor saja. Pengetrapan secara praktisnya, umumnya digunakan rumus sebagai berikut :

$$Vd = 21,1 m_o . r . \delta \ln \frac{D}{r}$$

Untuk cuaca baik, sedangkan untuk cuaca basah digunakan rumus sebagai berikut :

$$Vd = 16,9 m_o . r . \delta \ln \frac{D}{r}$$

di mana :

- $m_o = \text{faktor tak tertentu (irregular factor)}$
- $= 1,00 \text{ untuk konduktor yang permukaannya halus}$
- $= 0,93 – 0,98 \text{ untuk penghantar kasar.}$
- $= 0,83 – 0,87 \text{ untuk kawat berlilit}$
- $= 0,80 – 0,85 \text{ untuk kawat berlilit 15, 37 dan 61}$

Untuk mengurangi masalah Corona, maka perlu diperhitungkan masalah :

- Jari – jari konduktor
- Perbandingan antara jarak antar konduktor dengan jari – jari konduktor.
- Factor permukaan



Gambar 2 14  
Dua buah konduktor yang terletak parallel

### 2.3.2. Bahan konduktor berbentuk cair

Berbicara tentang konduktor, maka kita harus mengartikan bahwa bahan yang digunakan sebagai konduktor tersebut mempunyai banyak elektron bebas, sehingga elektron ini mudah berpindah dari pita konduksi ke pita valensi. Atau secara umumnya bahan logam tersebut dapat mengalirkan elektron / arus listrik.

Ada beberapa cara suatu bahan dapat menyalurkan arus listrik, yaitu :

- Disertai reaksi kimia
- Tanpa disertai reaksi kimia

#### 2.3.2.1 Bahan konduktor berbentuk cairan yang disertai reaksi kimia

Penghantaran arus listrik yang disertai reaksi kimia oleh zat – zat dalam bentuk cairan dinamakan penghantar elektrolisis atau kadang – kadang disebut ionis. Sedangkan penghantarnya sendiri disebut elektrolit.

Umumnya bahan ini merupakan larutan asam, basa atau garam. Untuk elemen kering, bahan yang merupakan cairan tersebut dipadatkan.

Banyaknya perubahan (zat) yang dihasilkan pada electrode – electrode dalam sebuah sel elektrolitis berbanding langsung dengan jumlah muatan listrik yang mengalir melalui elektrolisisnya. Sedangkan banyaknya bahan yang melekat pada electrode dari macam – macam bahan berbeda, meskipun waktu dan muatan listriknya sama.

Kesetaraan kimia listrik (Electro Chemical Equivalent) adalah berat unsure yang disebabkan oleh arus dalam satu coulomb (1 Ampere x 1 detik). Atau dapat dinyatakan dengan rumus matematika sebagai berikut :

$$W : Z . I . t \dots\dots\dots (2.18)$$

$$: Z . Q$$

Dimana :

- W : berat element yang melekat (m gram)
- Z : kesetaraan kimia listrik
- I : arus listrik (Ampere)
- t : waktu (detik)
- Q : Muatan listrik (Coulomb)

Berikut diberikan tabel (tabel 2.7) kesetaraan kimia listrik untuk beberapa bahan

Tabel 2.7 Kesetaraan kimia listrik beberapa bahan

Nomer	Nama bahan	Kesetaraan kimia listrik
1	Alumunium	0,0936
2	Besi	0,289
3	Emas	0,681
4	Tembaga	0,329
5	Timbel	1,072
6	Seng	0,3357
7	Perak	1,118
8	Air raksa	2,072
9	Nikel	0,304
10	Air	0,0104
11	Sulfat (SO <sub>4</sub> )	0,4975

#### 2.3.2.2. Bahan konduktor berbentuk cairan tanpa disertai reaksi kimia

Seperti halnya konduktor padat, maka pada konduktor jenis ini didalam fungsinya menyalurkan arus listrik tanpa disertai reaksi kimia, hanya saja bentuk listriknya berupa cairan.

Berikut diberikan beberapa contoh untuk konduktor berbentuk cair.

##### 2.3.2.2.1. Air Raksa (Hg)

Air raksa merupakan satu – satunya penghantar dalam keadaan cair dari unsure logam pada suhu kamar.

Sifat – sifatnya :

- Dapat melarutkan hampir semua logam, kecuali logam Platina, Nikel, Besi.
- Merupakan logam berat, dengan berat jenis 13,6
- Titik bekunya – 39 °C.

- Titik didihnya 357 °C
- Warnanya putih perak
- Tahanan jenis listriknya 0,93 Ohm mm<sup>2</sup>/m
- Koefisien suhu tahananannya 0,00027
- Mudah dioksidasikan, jika dipanasi dalam udara
- Uapnya sangat beracun.

Penggunaannya :

- Sebagai penyearah (mercury arc rectifier)
- Penghubung/saklar
- Sebagai gas lampu
- Untuk pengukuran sifat – sifat dielektrik logam padat.

#### 2.3.2.2.2 Asam Sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Asam Sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) adalah zat cair yang kental (pasta), tidak berwarna dan merupakan satu – satunya asam kuat pada suhu biasa. Selain itu Asam Sulfat mudah menyerap air membentuk hidrat. Dan karena sifat inilah maka Asam Sulfat dapat menyerap air dari persenyawaan – persenyawaan karbohidrat seperti gula, kayu dan sebagainya.

Asam Sulfat akan menjadi arang bila bercampur dengan Asam Sulfat pekat.

Penggunaannya :

- Untuk pengisi aki, dengan perbandingan 90 % air biasa dan 10 % asam sulfat pekat.
- Pembersih Gavano teknik.
- Dan lain – lain.

#### 2.3.2.2.4. Perak Nitrat (AgNO<sub>3</sub>)

Perak Nitrat diperoleh dengan mencampur antara perak murni dengan

Asam Nitrat.

Sifatnya :

- Kalau kena sinar matahari akan menjadi hitam.
- Warnanya seperti perak.

Penggunaannya :

- Sebagai saklar pilih.
- Sebagai elektrolit dalam penyepuhan logam dengan perak.

#### 2.3.2.2.5. Elektrolit

Elektrolit ada 2 macam, yakni elektrolit kuat dan elektrolit lemah.

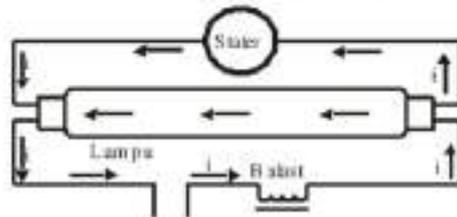
Elektrolit kuat adalah elektrolit yang penguraian dalam ion – ion sangat besar, misalnya asam – asam kuat, basa – basa kuat dan hampir semua garam.

Elektrolit lemah adalah elektrolit yang penguraian dalam ion – ion sangat lemah/kecil. Misalnya asam lemah, basa lemah dan air.

Penggunaannya : Sebagai bahan baterai.

### 2.3.3. Bahan konduktor berbentuk gas

Seperti halnya bahan konduktor berbentuk cair, maka pada bahan konduktor berbentuk gas disini yang dipentingkan adalah kemampuannya sebagai penyalur electron.



Gambar 2.15  
Prinsip aliran elektron pada lampu flourecent

Pada umumnya penghantar berbentuk gas dipergunakan pada lampu penerangan. Akan tetapi tidak semua gas yang digunakan pada lampu berfungsi sebagai penghantar. Misalnya pada lampu pijar. Pada lampu pijar gas yang berada didalamnya (Argon, Krypton dan sebagainya) berfungsi untuk mendapatkan warna sinar yang dikehendaki misalnya warna – warna : kuning, biru, ungu, hijau, putih, dan sebagainya. Disamping itu fungsi dari gas – gas tersebut adalah untuk menjaga

agar filamennya tidak cepat putus karena dengan penggunaan gas tersebut maka filament dapat tahan terhadap panas yang cukup tinggi atau dengan perkataan lain mempengaruhi penguapan bahan filamennya yang umumnya terbuat dari bahan Tungsten.

Prinsip penggunaan bahan konduktor berbentuk gas seperti yang terlihat pada gambar 2.15 diatas. Selain itu juga pada lampu – lampu Mercury, Natrium, Neon, Helium dan lain – lain. (Untuk lampu jenis pelepasan listrik, baik yang bertekanan rendah maupun yang bertekanan tinggi). Pada gambar sebelah kiri, merupakan saat pertama saklar (tegangan listrik) dimasukkan, sedangkan yang disebelah kanan pada saat lampu flourescent sudah menyala.

#### 2.4. Bahan Tahanan (Resistor)

Suatu bahan tahanan (Resistor) adalah merupakan suatu bahan listrik yang dapat menyalurkan arus listrik, akan tetapi mempunyai tahanan listrik yang tinggi. Dengan kata lain tahanan jenis bahan ini tinggi atau konduktifitasnya rendah.

Didalam teknikElektro, bahan ini sangat banyak dipakai terutama bila dikehendaki pembebanan yang cukup besar atau dikehendaki arus yang lewat cukup kecil. Misalnya dipakai untuk :

- elektronika
- kumparan shunt
- peralatan pemanas
- dan lain – lain

Contoh bahan tahanan adalah sebagai berikut :

##### 2.4.1 Wolfram

Wolfram termasuk bahan logam yang sangat berat. Berwarna putih keabu – abuan. Dalam keadaan bebas pada umumnya terikat sebagai oksida ( $WO_3$ ), Wolframite  $[(FeMn)WO_4]$ , Calsium Tungstate ( $CaWO_4$ ) dan lain – lain.

Pada pengolahan wolfram, Wolfram didapatkan dari oksidanya ( $WO_3$ ) sedangkan  $WO_3$  didapat dari pengolahan biji – biji wolfram.

Wolfram adalah merupakan jenis logam yang mempunyai titik cair tertinggi diantara logam – logam padat, sehingga untuk mendapatkan wolfram yang murni diperlukan panas yang sangat tinggi. Hasil pengolahan terakhir dapat mencapai 99,25% Wolfram murni.

Sifat – sifatnya :

Sifat mekanik :

tensile strength : 590.000 psi  
 modulus of elstisty : 10,106 psi

Sifat termis :

- titik cair : 3.390 °C  
 - titik didih : 5.930 °C  
 - konduktifitas termis : Cal/Cm sec °C  
 - koefisen muai panjang :  $4,5 \times 10^{-6}$

Sifat kimia :

- Pada suhu 2000 °C, 1001 gram murni dapat bersenyawa dengan  $O_2$ , membentuk  $WO_2$  dan  $WO_v$ .

Sifat listrik :

- tahanan jenis pada 20 °C : 0,0505 ohm  $mm^2/m$   
 - tahanan jenisnya mendekati linear terhadap temperature  
 - magnetic susceptibility  $x_m$  :  $6,8 \times 10^{-5}$  (termasuk bahan magnetic)

Sifat umum

- Berat jenis pada 20 oC : 19,3  
 - dari sifat – sifatnya dapat diketahui bahwa wolfram merupakan logam yang sangat padat dan mempunyai titik cair tertinggi diantara logam yang lain.  
 - logam ini harus dikerjakan pada waktu sangat panas secara mekanis.

Penggunaan wolfram :

- filament pada lampu pijar
- campuran bahan kontak
- elektroda las gas mulia
- bagian – bagian tabung elektron.
-

### 2.4.2 Timbel/Timah Hitam (Pb)

Pengolahannya, bahan – bahan campuran yang terdapat dalam bijih timah hitam, dipisahkan dengan menggiling, memanaskan dan mencairkannya dan sesudah itu timah hitam dituang dalam cetakan samapi jadi balok – balok.

Timah hitam didalam perdagangan didapati sebagai berikut :

- Timbel dan berupa lempengan 3 x 1,5 m dan 10 x 2,5 m, dengan tebal 0,3 – 12 mm.
- Sangat lunak dan mudah dikerjakan.
- Mempunyai berat jenis yang tinggi.
- Titik leburnya rendah  $\pm 300^{\circ}\text{C}$ .
- Tahanan jenisnya  $\pm 7\%$  dari tembaga.
- Tegangan tariknya rendah.

Penggunaannya :

- Sebagai electrode akumulator.
- Sebagai pembungkus kabel
- Campuran solder.
- Untuk sekering.

### 2.4.3. Nikel (Ni)

Nikel kebanyakan dipakai untuk resistor dengan dicampur bahan lain, misalnya Carbon, Copper, Chrome, Ferro, Mangan, Silikon dan Fink.

Sifat Nikel :

- Tahanan jenisnya 1,05
- Daya tahan terhadap karat besar.
- Mempunyai warna putih seperti perak, keras dan sukar cair.
- Titik cairnya  $1455^{\circ}\text{C}$ .

### 2.4.4. Campuran Nikel (Nikel alloy)

Campuran – campuran nikel banyak dipakai sebagai tahanan / resistor listrik, Rheostat Electric Heating Unit.

#### 2.4.4.1 Nikel Chromium Alloy (Ni-Cr)

Sifat – sifatnya ;

- Tahanan listriknya cukup tinggi .....
- Koefisien temperaturnya cukup rendah
- Tahan terhadap oksidasi (sampai  $1100^{\circ}\text{C}$ )
- Daya tahan terhadap korosi cukup rendah.
- Berpijar pada daerah sinar merah.

Penggunaannya :

- Dipakai pada elemen – elemen pemanas listrik, missal oven, setrika listrik, solder dan kompor listrik (80 % Ni dan 20 % Cr).

#### 2.4.4.2. Ferro Nikel Alloy (Fe–Ni)

Sifat – sifatnya :

- Logam ini mempunyai warna putih perak dan sebenarnya sama dengan yang dipakai sebagai alat pemanas.

## 2.5. Thermistor

Perkataan Thermistor berasal dari kata thermally sensitive resistor. Thermistor adalah suatu macam tahanan yang peka terhadap pengaruh suhu, yang secara sederhana adalah alat – alat jepitan semikonduktor (two terminal semikonduktor device).

Prinsip thermistor ditemukan oleh Michael Faraday berdasarkan koefisien temperatue negative dari silver sulfide pada tahun 1883. Secara sederhana ditunjukkan pengaruh temperature terhadap tahanan seperti berikut.

$$R_{t_2} : R_{t_1} [1 + \alpha (t_2 - t_1)] \dots\dots\dots (2.19)$$

Di mana :

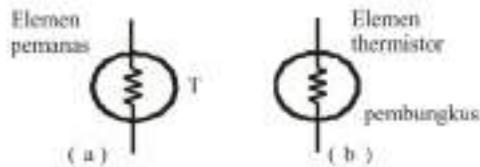
$R_{t_1}$  : tahanan dari bahan pada temperatur  $t_1$  (ohm)

$R_{t_2}$  : tahanan dari bahan pada temperatur  $t_2$  (ohm)

$t_1$  : temperatur permulaan yang rendah ( $^{\circ}C$ )

$t_2$  : temperatur yang lebih tinggi ( $^{\circ}C$ )

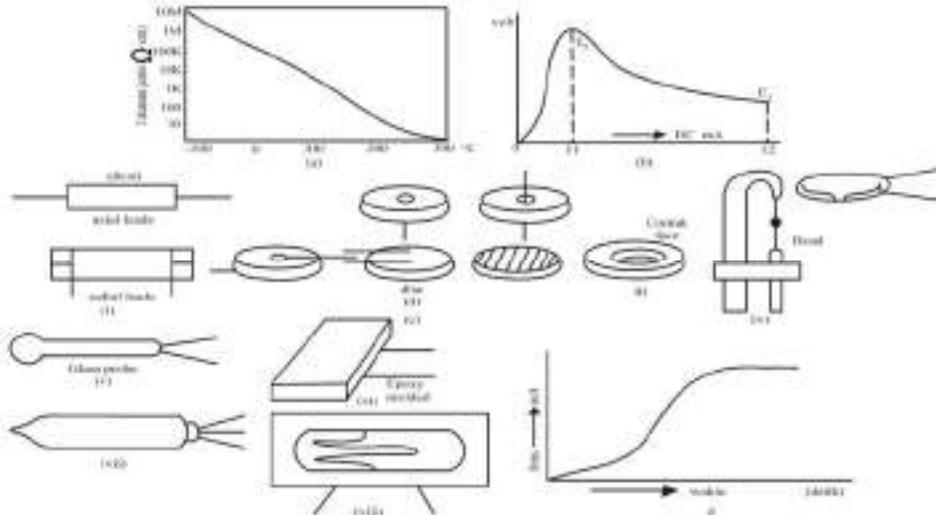
$\alpha$  : koefisien temperatur dari bahan (ohm /  $^{\circ}C$ )



Gambar 2.16  
Simbol dari thermistor

- (a) Thermistor dengan pemanas langsung
- (b) Thermistor dengan pemanas tidak langsung

Thermistor pada umumnya didasarkan pada “negative temperature koefisien (NTC)”, tetapi selain itu ada pula yang berdasarkan pada “positif temperature koefisien (PTC)”. Berikut digambarkan beberapa karakteristik dari thermistor



Gambar 2.17  
Karakteristik dari thermistor

- (a) Karakteristik tahanan jenis – temperature
- (b) Karakteristik tegangan – arus
- (c) Konfigurasi dari thermistor, i(rod), (ii)Disk, (iii)Washer, (iv)Bead, (v)Glass probe, (vi)Epoxi Molded (vii) indirectly heated dan (viii)Thin film
- (d) Karakteristik arus - waktu

Penggunaannya:

- Basic thermometer circuit.
- Half bridge thermometer
- Basic four arm bridge type thermometer
- Two thermistor thermometer

- Temperature measurement
- Anemometer
- Flow meter
- Vacuum gauge
- Alti meter
- Rf power meter
- Measuring microwave meter
- Gas analyzer
- Thermal protection for motor
- Pilot for flame alarm control
- Voltage regulation
- Remote control
- Audio compressor (umeter)
- Audio expander
- Pilot lamp protection
- Crystal oscillator stabilization
- Dan lain - lain
- 

## **2.6 Bahan kontak**

Didalam praktek sehari – hari, semua jenis alat – alat pengalir arus dan alat – alat control memerlukan suatu cara untuk membuka dan menutup rangkaian listrik. Fungsi dari penutupan dan pemutusan rangkaian ini dilakukan dengan menyatukan dan memisahkan dua atau lebih bahan kontak. Agar peralatan kontak ini umurnya dapat panjang maka kita harus mengetahui fungsi, kualitas bahan, cara kerja dan lain - lain yang berhubungan dengannya.

### **2.6.1 Syarat – syarat bahan yang diperlukan sebagai alat kontak listrik**

Kontak listrik sebagai alat yang digunakan untuk membuka dan menutup rangkaian / jaringan listrik, memerlukan syarat – syarat tertentu agar kontak listrik dapat tahan lama dan tidak menimbulkan gangguan / kerugian :

- Bahannya harus kuat terhadap gaya – gaya mekanis yang ada/dikenakan padanya.
- Bahannya harus mampu dialiri oleh arus yang melewatinya
- Harus mempunyai tahanan jenis yang kecil.
- Harus dapat bekerja dengan baik dimana saja.
- Harus tahan terhadap korosi
- Harus tahan terhadap tegangan kerja yang dibutuhkan.
- Harus mempunyai titik cair yang cukup tinggi, karena adanya tahanan listrik pada bahan kontak dan pekerjaan dari kontak itu sendiri, sebagai pembuka dan penutup rangkaian/jaringan listrik akan selalu menimbulkan bunga api.

### **2.6.2. Tahanan pada kontak listrik**

#### **2.6.2.1 Faktor – factor yang mempengaruhi tahanan kontak**

Kegagalan pada suatu rangkaian /jaringan listrik mungkin dapat terjadi karena besarnya tahanan dari pada kontak. Oleh karena itu didalam memilih/memakai kontak listrik, kita harus memperhatikan beberapa factor yang dapat mempengaruhi tahanan kontakannya antara lain adalah :

- Tahanan jenis bahan kontak.
- Lapisan yang ada pada permukaan kontak
- Tekanan yang dikenakan padanya, karena hal ini akan mempengaruhi luas kontak efektif yang dilalui oleh arus listrik.

#### **2.6.2.2. Karakteristik dari pada tahanan bahan kontak**

Apabila suatu bahan kontak beroksidasi (berkarat), dimana pada umumnya terjadi pada lapisan permukaan kontak, maka tahanan kontak akan bertambah besar sampai beberapa kali. Oleh karena itu kadang – kadang kegagalan dari kerja kontak dapat terjadi meskipun kontak bekerja pada tegangan rendah 127/220 volt, hal ini disebabkan karena adanya lapisan oksidasi yang terjadi, lebih banyak bersifat sebagai bahan isolator dari pada sifat konduktornya. Oksidasi yang terjadi pada bahan tembaga akan mempunyai tahanan listrik yang sangat tinggi, pada perak gangguan tersebut kecil.

Apabila dua kontak yang sebelumnya telah beroksidasi disatukan dengan memberikan tegangan, maka tahanan kontak akan berkurang dengan bertambah besarnya arus, karena oksid metal mempunyai karakteristik tahanan jenis yang negative.

Perak mempunyai karakteristik yang menarik jika ia dipandang dari sudut oksidasi, berbeda dengan bahan kontak yang lain, karena apabila oksida perak atau Sulfida Perak dipanasi diatas 200 °C maka oksida tersebut akan kembali menjadi Perak murni lagi. Sehingga Perak banyak digunakan untuk bahan kontak terutama untuk konduktor – konduktor alat yang bersifat peka dan disamping itu perak mempunyai jenis yang cukup rendah. Tembaga lebih cepat beroksidasi dan Perak sangat lamban, karena itu Perak dapat berumur lebih panjang bila dibandingkan dengan Tembaga, apabila dipakai untuk membuka atau menutup rangkaian dengan arus yang kecil. Mengingat setiap terjadi pembusuran bunga api pada setiap permukaan kontak, maka pada bagian tersebut akan berpijar dan selanjutnya timbul oksida yang tergantung pada karakteristik oksidanya. Kelemahan Perak sebagai bahan kontak adalah bahwa Perak mempunyai “kapasitas panas” yang lebih rendah dari pada tembaga, sehingga Perak tidak digunakan sebagai bahan kontak pada arus yang besar (yang dimaksud dengan kapasitas panas / thermal Capacity adalah besarnya energi yang diperlukan untuk mencairkan atau menguapkan bahan metal dalam waktu tertentu). Tungsten, Wolfram, Nikel dan Tembaga adalah merupakan bahan – bahan kontak yang mempunyai kapasitas panas lebih tinggi bila dibandingkan dengan perak.

#### 2.6.2.3. Umur kontak bila bekerja dalam minyak

Apabila suatu kontaktor membuka dan menutup (bekerja) dalam minyak, maka bunga api yang terjadi pada umumnya berada pada tempat yang sama selama pembusuran bunga api itu terjadi. Keadaan tersebut disebabkan karena Viscositas (kekentalan) daripada minyak dalam menahan Bergeraknya pembusuran bunga api tersebut sehingga terjadilah pencairan setempat pada kontak. Pencairan ini tergantung pada kapasitas panas dari bahan kontak. Oleh karena itu Perak akan berumur lebih pendek bila bekerja dalam minyak yang kental. Tembaga akan berumur dua kali dari Perak, sedangkan campuran antara Perak dan Tembaga akan dapat berumur dua kali dari tembaga.

Didalam dunia perdagangan banyak sekali dijumpai kontaktor – kontaktor yang direndam dalam minyak. Hal ini terutama digunakan bila sudah diperkirakan pada tempat disekitar kontak tersebut terdapat bahan – bahan yang mudah terbakar atau untuk melindungi peralatan – peralatan lain (termasuk manusia dan hewan) terhadap bunga api yang mungkin terjadi.

#### 2.6.2.4. Bahan – bahan kontaktor listrik

Tembaga, Perak, Tungsten, Cadmium, Nikel, Karbon, Air raksa, Palladium adalah merupakan bahan – bahan yang banyak digunakan sebagai bahan kontak atau campuran dari padanya. Dari bahan – bahan tersebut diatas, mengingat sifat – sifatnya maka Tembaga, Perak, Tungsten dan Karbon banyak digunakan sebagai bahan kontak.

Karakteristik bahan kontak secara singkat dapat dijelaskan sebagai berikut :

##### 2.6.2.4.1 Tembaga

Tembaga merupakan sebuah bahan yang mempunyai sifat yang sangat baik sebagai bahan kontak karena :

- Tembaga merupakan suatu bahan yang harganya tidak terlalu mahal.
- Tahanan jenisnya relative rendah.
- Kapasitas panasnya cukup tinggi.
- Kekuatan mekanisnya cukup tinggi.

Kejelekannya :

Tembaga mempunyai sifat yang mudah beroksidasi dengan zat asam dan karena sifat yang demikian inilah dapat mkenyebabkan umur kontak lebih pendek.

##### 2.6.2.4.2. Perak

Perak mempunyai karakteristik yang cukup baik sebagai bahan kontak, karena :

- Tahanan jenisnya cukup rendah.
- Perak lambat beroksidasi dan bila terjadi oksidasi maka pada temperature diatas 200 °C oksida Perak berubah menjadi Perak murni lagi.
- Apabila dilalui arus yang kecil, maka umurnya akan lebih panjang bila dibandingkan dengan bahan Tembaga.

Kejelekannya :

- Perak ± 20 % lebih mahal dari pada Tembaga.
- Kapasitas panasnya lebih rendah dari Tembaga.
- Bahan Perak terlalu lunak sehingga tidak memuaskan bila dipakai pada tegangan tarik/tekan yang besar.

#### 2.6.2.4.3. Tungsten

Tungsten mempunyai karakteristik yang baik dan dapat melakukan pekerjaan kontak tertentu dengan sangat memuaskan, terutama apabila dicampur dengan Perak, akan tetapi pemakaiannya terbatas, yakni :

- Dipergunakan sebagai kontak penyalu dengan arus < 100 Ampere.
- Kontaktor dari bahan Perak dan Tungsten adalah campuran bahan kontak yang baik untuk operasi kontak yang sering, dimana kontaktor Perak sebagai anoda dan Tungsten sebagai katoda.
- 

#### 2.6.2.4.4 Cadmium

Cadmium mempunyai karakteristik :

- Mendekati karakteristik Perak.
- Mempunyai titik cair yang rendah, sehingga akan mudah meleleh bila terjadi pembusuran bunga api.

Karena sifat – sifat tersebut, maka Cadmium tidak banyak dipakai bahan kontak murni. Baru dipakai dalam bentuk campuran.

#### 2.6.2.4.5 Nikel

Nikel mempunyai sifat :

- Mempunyai warna putih seperti Perak.
- Seperti halnya Cadmium, maka Nikel hanya dipergunakan sebagai bahan campuran, yakni 85 % Perak dan 15 % Nikel merupakan bahan yang baik sebagai bahan kontak.

#### 2.6.2.4.6 Karbon

Karbon jarang dipakai sebagai bahan kontak, karena mempunyai kekurangan – kekurangan :

- Mudah pecah.
- Tahanan jenisnya cukup tinggi.

Walaupun demikian Karbon kadang – kadang juga dipakai sebagai bahan kontak, karena :

- Tidak mudah beroksidasi pada suhu yang rendah.
- Mempunyai keandalan yang tinggi bila dikenai tekanan yang ringan.
- Karbon tidak dapat meleleh.

#### 2.6.2.4.7 Air Raksa

Air raksa adalah satu – satunya bahan kontak dalam bentuk cair pada temperature rendah.

Sifat – sifatnya :

- Air Raksa cair pada suhu biasa/kamar.
- Dibawah tempertur – 40 °C air raksa berubah menjadi bentuk padat.
- Titik didihnya 350 °C.

Karena sifat – sifatnya tersebut, maka air raksa dipakai sebagai bahan kontak dan sebagai pengalir arus seperti pada tabung gas (mercury arc rectifier).

#### 2.6.2.4.8 Palladium

Palladium adalah suatu elemen yang mahal, akan tetapi :

- Tidak dapat beroksidasi.
- Baik untuk tegangan rendah dan arus yang kecil.
- Mempunyai keandalan yang tinggi.
- Banyak yang dipergunakan pada jaringan telekomunikasi.
- 

#### 2.6.2.4.9 Emas

Emas adalah suatu bahan yang mahal dan mempunyai sifat :

- Emas murni sangat lunak dan mudah meleleh.
- Perpaduannya dengan Perak akan mendapatkan kekerasan yang besar.
- Kontak Emas dapat dipergunakan untuk kontak ringan dan tegangan rendah serta arus yang kecil.

Karena Emas lembek dan mudah meleleh, sehingga jarang dipakai.

Soal latihan :

1. Jelaskan karakteristik yang wajib di punyai oleh bahan konduktor.
2. Jelaskan pengaruh kenaikan temperatur terhadap nilai tahanan suatu bahan.
3. Hitunglah tahanan DC dari sebuah konduktor  $253 \text{ mm}^2$  (  $500.000 \text{ cm}$ ) dalam ohm per km pada  $75^\circ \text{ C}$ , misalkan Cu 100 %
4. Apa yang dimaksud dengan skin effect dan bagaimana cara mengatasinya.
5. Jelaskan apa yang di maksud dengan karakteristik mekanis.
6. Jelaskan apa yang dimaksud dengan batas elastis dan regangan elastis dari bahan
7. Jelaskan apa yang dimaksud dengan derajat kelentingan dan derajat ketangguhan
8. Jelaskan apa yang dimaksud dengan kapasitas penyaluran arus dari suatu penghantar
9. Jelaskan apa yang dimaksud dengan kapasitas hantar panas dari suatu penghantar
10. Jelaskan bagaimana proses terjadinya gejala corona
11. Jelaskan syarat-syarat bahan kontak yang baik.

## BAB III

### BAHAN SEMI KONDUKTOR

Tujuan Instruksional : Mahasiswa dapat mengerti dan memahami tentang defenisi dari bahan semikonduktor, bahan dasar pembuatan bahan semi konduktor silikon dan germanium, sifat fisis bahan semikonduktor proses pembuatan bahan semi konduktor, semikonduktor intrinsik dan extrinsic semikonduktor dan pemanfaatan bahan semikonduktor dalam bidang listrik. Pembuatan bahan P type semikonduktor dan N type semikonduktor, aplikasi semikonduktor.

#### 3.1 PENDAHULUAN

Dalam dunia kerja, manusia diajari oleh teknologi untuk memecahkan masalah-masalah kerja secara efisien dan efektif. Tidak heran kalau hal ini berpengaruh secara kuat terhadap pengelolaan serta organisasi perusahaan-perusahaan dan industri agar tak tertinggal dalam persaingan global

Kemampuan menguasai teknologi tinggi adalah merupakan syarat mutlak bagi suatu negara untuk memasuki negara industri baru. Salah satu bidang teknologi tinggi yang sangat mempengaruhi peradaban manusia di abad ini adalah teknologi semikonduktor dan mikro-elektronika. Dewasa ini bahan semikonduktor organik mendapat perhatian baik dari kalangan peneliti maupun industri. Hal ini dikarenakan sifatnya yang ramah lingkungan, dalam arti mudah hancur dalam alam. Sehingga sampahnya tidak merusak lingkungan. Bidang ini biasanya dianalogikan dengan tiga kata bahasa Inggris yang mempengaruhi kehidupan modern yaitu Computer, Component dan communication. Untuk komputer, topik utama dalam bidang ini adalah bagaimana membuat komputer menjadi lebih cepat, lebih ramping dengan fungsi yang lebih kompleks dan konsumsi daya yang makin kecil. Untuk tujuan tersebut, terdapat dua pendekatan yang saling mendukung yakni dari segi hardware dan software. Dari segi hardware adalah bagaimana membuat transistor sebagai komponen aktif terkecil menjadi semakin kecil dan berkecepatan tinggi. Dari segi software adalah bagaimana mendesain rangkaian terpadu (integrated circuit) yang makin kompleks menjadi semakin ramping dan kompak. Tulisan di bawah ini membahas mengenai pendekatan dari segi hardware yakni perkembangan dari divais - divais elektron (elektron devices) saat ini dan yang akan datang sebagai komponen dasar peralatan semikonduktor/elektronika, dengan tinjauan dari sudut material semikonduktor itu sendiri.

Seperti yang telah dibahas pada Bab I, maka untuk diagram pita energi pada bahan semi konduktor mempunyai celah yang cukup kecil. Ini berarti bahwa pada temperature biasa/kamar elektron – elektron yang terdapat pada pita valensi tidak dapat berpindah ke pita konduksi, sehingga pada temperature tersebut bahan semi konduktor bersifat sebagai bahan penyekat.

#### 3.2 Sifat – sifat fisis bahan semi konduktor

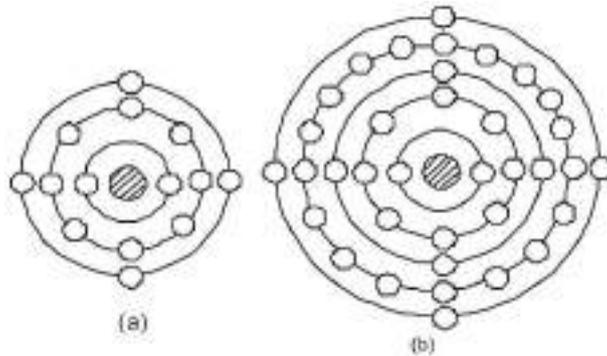
Bahan – bahan seperti Silicon dan Germanium yang biasanya dipakai sebagai bahan semi konduktor, terdapat dalam kolom keempat dari pada sistem periodik unsure – unsur kimia. Pada material/logam ini, lapisan terluar elektron – elektron yang sering juga disebut lapisan valensi (menurut model atom Bhor), terdiri atas empat elektron yang memungkinkan suatu hablur atau kristal murni untuk membentuk ikatan – ikatan kovalen yang kuat.

##### 3.2.1 Struktur Fisis Bahan Semi konduktor

Silikon dan germanium adalah bahan yang biasanya dipakai sebagai bahan semi konduktor. Kedua bahan tersebut terdapat dalam kolom ke empat dari sistem periodik unsur-unsur kimia. Pada material ini, lapisan terluar elektron-elektron yang sering juga disebut lapisan valensi (menurut model atom Bohr), terdiri dari empat elektron yang memungkinkan suatu hablur atau kristal murni untuk membentuk ikatan-ikatan kovalen yang kuat.

Pada struktur atom silikon murni terdapat tiga lapisan yaitu lapisan dalam mempunyai dua elektron, lapisan tengah mempunyai delapan elektron, dan lapisan luar mempunyai empat elektron. Sedangkan pada struktur atom germanium murni, terdapat empat lapisan masing-masing mengandung dua, delapan, delapan belas, dan empat elektron. Ikatan kovalen yang terjadi adalah sangat kuat sekali, sehingga akan diperlukan energi yang cukup besar untuk membebaskan

sebuah elektron dari ikatannya. Dapat dikatakan bahwa pada temperatur kamar, bahan semi konduktor murni mempunyai tahanan listrik yang sangat tinggi, oleh karena itu merupakan bahan isolator. Tahanan jenis bahan semi konduktor akan turun dengan naiknya temperatur. Untuk mempersiapkan bahan semi konduktor murni, misalnya digunakan sebagai transistor atau penyearah (*rectifier*), perlu dilakukan rekayasa (*engineering*) sehingga energi dari elektron-elektron pada lapisan valensi bertambah. Hal ini dapat dilakukan dengan suatu proses yang biasanya disebut *doping*, dimana bahan semi konduktor dicampur dengan bahan lain.

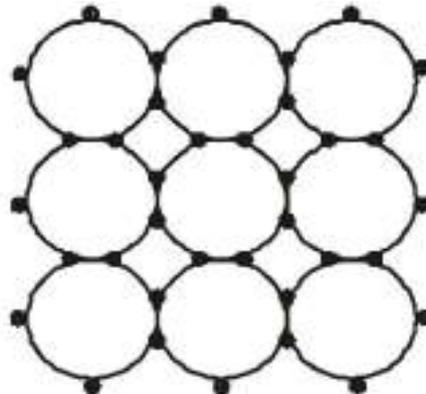


Gambar 3.1  
Struktur atom bahan semi konduktor murni  
(a) Silikon  
(b) Germanium

Pada struktur atom Silikon murni terdapat tiga lapisan :

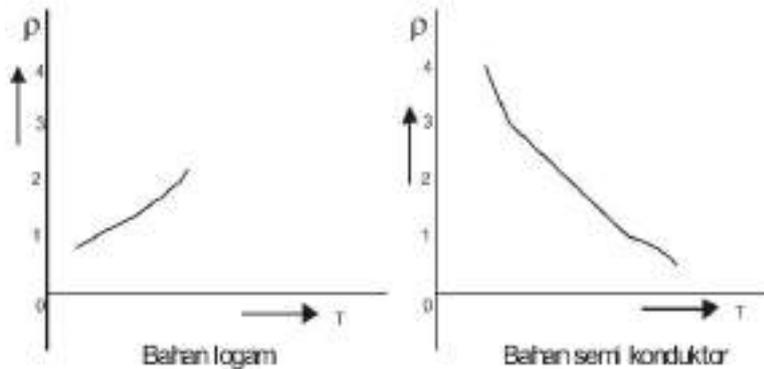
- Lapisan dalam mempunyai dua electron
- Lapisan tengah mempunyai delapan electron.
- Lapisan luar mempunyai empat electron.

Pada struktur atom Germanium murni, terdapat empat lapisan masing – masing mengandung dua, delapan, delapan belas, dan empat electron. Cara pengikatan elektron – elektron valensi dapat diperlihatkan seperti pada gambar berikut :



Gambar 3.2  
Cara pengangkatan elektron- electron pada bahan  
Semi konduktor murni

Ikatan kovalen yang ada adalah sangat kuat sekali, sehingga akan diperlukan energi yang cukup besar untuk membebaskan sebuah elektron dari ikatannya. Sehingga dapat dikatakan bahwa pada temperature kamar, bahan semikonduktor murni mempunyai tahanan listrik yang sangat tinggi, oleh karena itu merupakan bahan isolator. Untuk mempersiapkan bahan semi konduktor murni bagi penggunaannya misalnya untuk transistor atau penyearah, perlu dilakukan perubahan – perubahan, sehingga energi dari elektron – elektron dilapisan valensi bertambah. Hal ini dilakukan dengan suatu proses yang biasanya disebut “doping”, dimana bahan semikonduktor dicampur dengan bahan lain. Pengaruh suhu pada hambatan jenis untuk logam dan semi konduktor dapat dibedakan seperti gambar berikut :



Gambar 3.3  
Karakteristik tahanan jenis sebagai fungsi temperature

Dari karakteristik diatas dapat dilihat, bahwa pada logam tahanan jenis bertambah secara linier terhadap kenaikan temperature  $T$  sedangkan pada bahan semi konduktor berlaku sebaliknya, justru tahanan jenis malah turun pada kenaikan temperatur.

### 3.3 Pengaruh Panas dan Cahaya.

Bila sebuah konduktor dipanasi, atom-atom (yang berada di lokasi tetap) cenderung bergetar, dan getaran menimbulkan gerakan massa elektron di sekitarnya. Ini berarti bahwa ada pengurangan pada aliran elektron yang membangun arus listrik, dan bahwa resistansi konduktor telah meningkat. Suatu konduktor mempunyai suatu *positive temperature coefficient* (koefisien suhu positif) dari resistansi, yaitu resistansi bertambah besar bila suhunya naik.

Bila bahan konduktor yang belum di-*doping* pada suhu absolut  $0^{\circ}\text{K}$  ( $-273^{\circ}\text{C}$ ), praktis tidak ada elektron bebas di *conduction band* dan tidak ada hole di *valence band*. Hal ini karena semua elektron berada di orbit normal sekitar atom-atom. Jadi, pada suhu absolut  $0^{\circ}\text{K}$ , sebuah konduktor berperilaku seperti insulator. Bila bahan itu dipanasi, elektron-elektron melepaskan diri dari atom-atomnya dan bergerak dari *valence band* ke *conduction band*. Hal ini menimbulkan hole di *valence band* dan elektron-elektron bebas di *conduction band*. Kemudian terjadi konduksi dengan adanya gerakan elektron dan dengan adanya pemindahan hole. Semakin besar pemberian energi termal menimbulkan semakin banyak pasangan hole-elektron. Seperti halnya pada konduktor, atom-atom semikonduktor juga mengalami getaran termal. Tapi, ada sangat sedikit elektron yang timbul dibandingkan dengan kerapatan massa elektron dalam konduktor. Timbulnya elektron secara termal merupakan faktor dominan, dan arus bertambah besar dengan naiknya suhu. Hal ini menunjukkan penurunan resistansi semikonduktor dengan kenaikan suhu, yaitu koefisien suhu negatif. Perkecualian dari aturan ini adalah *heavily doped semiconductor material* (bahan semikonduktor yang di-*doping* berat), yang lebih bersifat seperti konduktor dari pada semikonduktor.

Seperti halnya energi termal yang menyebabkan elektron-elektron memisahkan diri dari ikatan atomnya, juga pasangan-pasangan hole-elektron dapat ditimbulkan oleh energi yang dipancarkan pada semikonduktor dalam bentuk cahaya. Jika bahan semikonduktor intrinsik, mempunyai sedikit elektron bebas bila tidak disinari, jadi suatu *very high dark resistance*. Bila disinari, resistansinya turun dan menjadi dapat dibandingkan dengan konduktor.

### 3.4 Macam bahan semi konduktor

Bahan semikonduktor secara garis besar dapat dibedakan atas dua macam yaitu :

- Intrinsic semi konduktor .
- Extrinsic semi konduktor .

#### 3.4.1 Intrinsic semi konduktor (bahan semi konduktor murni)

Pada bahan intrinsic semi konduktor, hantaran listrik yang terjadi disebabkan oleh mengalirnya elektron karena panas. Jenis bahan intrinsic semi konduktor umumnya mempunyai valensi empat. Dan ikatan dalam kristal adalah ikatan kovalen, hal ini dapat dimengerti karena elektron valensi pada kulit terluar dipakai secara bersama – sama.

Apabila temperature naik, maka akan terjadi ‘random thermis’ dan akan ada elektron yang bebas dari ikatannya (elektron pada kulit luarnya). Dengan terlepasnya elektron ini dari ikatan atomnya, maka terjadilah kekosongan elektron dan sering disebut ‘hole’. Hole mempunyai sifat seperti partikel – partikel dapat menghantarkan arus listrik karena dapat berpindah – pindah dan

dianggap sebagai “ partikel yang bermuatan positif “ sebesar muatan electron. Gerakan Hole ini menyebabkan gerakan pada elektron yang terikat.

Sifat – sifat intrinsic semi konduktor :

Sebagaimana yang telah dijelaskan diatas, maka sifat – sifat bahan intrinsic semi konduktor dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Jumlah elektron bebas sama dengan jumlah hole.
- Hantaran arus disebabkan oleh elektron bebas dan hole.
- Arah pergerakan hole sama dengan arah polaritas medan listrik E dan berlawanan arah dengan pergerakan electron.
- Umur rata – rata (average life time) nya adalah  $\pm 100 - 1000$  detik atau lebih. Umur rata – rata dari sepasang electron-hole adalah jumlah waktu saat tertutupnya electron-hole pair sampai bertemunya elektron bebas dengan hole pair. Adapun yang mengisi hole, pada umumnya adalah elektron yang terikat dilapisan disebelah bawahnya.
- Umur rata – rata dari elektron hole pair tergantung pada : kemurnian bahan, bahan dikatakan murni apabila mempunyai perbandingan  $1 : 10^{10}$  , serta kesempurnaan bentuk kristalnya.

### 3.4.2 Extrinsic semi konduktor (impurity semi konduktor – semi konduktor yang tidak murni).

Jenis bahan extrinsic semi konduktor didapat dengan jalan mengadakan doping antara bahan intrinsic semi konduktor dengan bahan yang valensinya berada dibawah atau diatas intrinsic semi konduktor.

Atas dasar tersebut, dibedakan dua jenis ekstrinsic semi konduktor, yaitu :

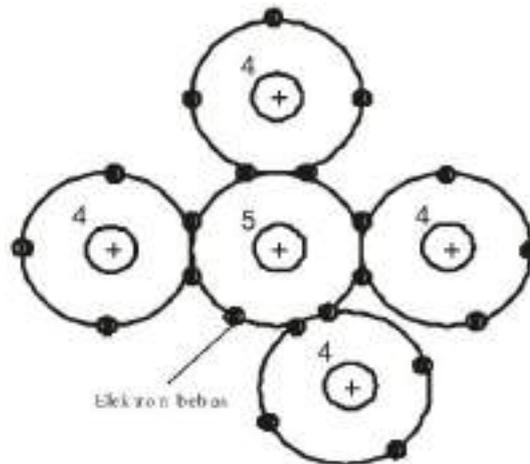
- N-type semi konduktor.
- P-type semi konduktor.

Bahan – bahan tersebut diatas seperti pada tabel berikut

Tabel 3.1 Daftar klas dari bebrapa bahan

III	IV	V
Alumunium Al (13)	Silikon Si (14)	Pospor P (15)
Gallium Ga (31)	Germanium Ge (32)	Arsenic As (33)
Indium In (49)	Timah Sn (50)	Antimony Sb (51)

### 3.4.3 N-type semi konduktor



Gambar 3.4  
N - Type Semi konduktor

Atom bahan intrinsic semi konduktor yang bervalensi 4 bila di doping dengan atom yang lain yang valensinya lebih tinggi (misalnya valensinya 5), maka molekul bahan campuran akan mengalami kelebihan satu electron, selanjutnya elektron ini merupakan electron bebas (lihat gambar 3.4 diatas).

Pen-doping-an dapat dilakukan melalui proses pemanasan, sehingga akan terjadi penyesuaian diri dari dua macam atom yang berbeda valensinya dalam membentuk suatu molekul / kristal.

Atom yang menyebabkan terjadinya elektron bebas dalam satu susunan kristal atom disebut atom donor, dan jenis bahan semacam ini dinamakan N type semi konduktor.

Didalam tubuh N type semi konduktor dapat diperoleh dua pembawa muatan, yaitu :

- Elektron sebagai "majority carrier".
- Hole sebagai "minority carrier".

Pada energi level band, keterangan diatas dapat dijelaskan seperti berikut :

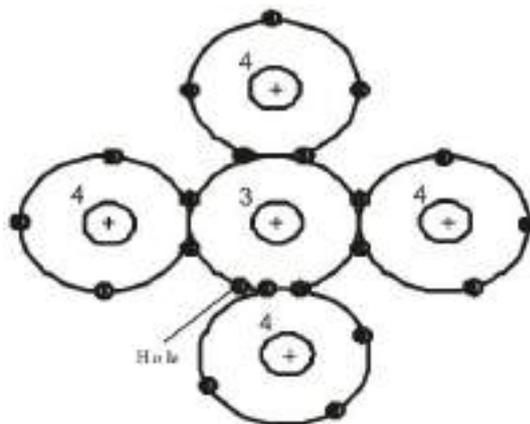


Gambar 3.5  
Energi Level band pada bahan N type semi konduktor

Dengan adanya kelebihan electron, maka akan memberikan energi level baru, dimana elektron akan lebih mudah bereksitasi ke pita valensi.

Jadi pada N type semi konduktor akan terjadi energi level baru yang disebut sebagai energi level donor (Ed), dimana pada level ini berisi penuh dengan electron, sehingga apabila ada elektron yang berpindah ke pita valensi, maka elektron ini akan meninggalkan muatan positif pada level donor. Akibatnya pada atom yang bervalensi 5 terkumpul muatan positif.

### 3.4.4 P-type semi konduktor



Gambar 3.6  
P – Type semi konduktor

Apabila atom intrinsic semi konduktor yang bervalensi 4 di doping dengan atom yang bervalensi 3, maka pada pencampuran ini akan terjadi kekurangan elektron atau akan terdapat lubang (hole). Seperti halnya pada N-type semi konduktor, maka doping ini dilakukan dengan pemanasan, sehingga setiap atom dapat menyesuaikan dirinya dengan baik dan akan memberikan kristal.

Dengan adanya hole (kekurangan electron) , maka hole ini akan menarik elektron dari atom yang berdekatan dan selanjutnya atom yang telah kehilangan elektron tersebut akan menjadi lubang, dengan jalan demikian, maka hole dapat berganti – ganti seakan – akan merupakan muatan listrik positif yang sedang bergerak.

Atom yang menyebabkan timbulnya hole dalam susunan kristal disebut "atom acceptor" dan jenis bahannya dinamakan P-type semi konduktor.

Ada dua pembawa muatan pada P type semi konduktor, yaitu :

- Hole yang berupa "majority carrier".
- Elektron sebagai "minority carrier".

Pada energi level band, keterangan diatas dapat dijelaskan sebagai berikut :

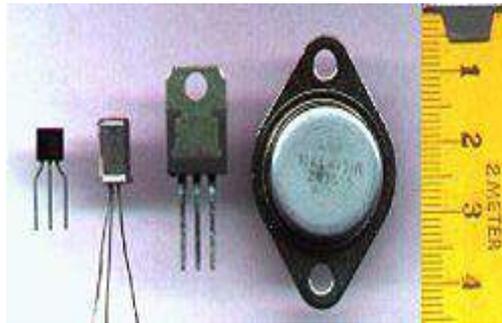
Dengan adanya kekurangan electron, maka akan memerlukan suatu energi level baru dimana elektron yang terdapat pada pita valensi akan berpindah ke level energi band yang baru tersebut. Level yang kosong tersebut dinamakan level acceptor ( $E_a$ ).



Gambar 3.7  
Energi Level band pada bahan P type semi konduktor

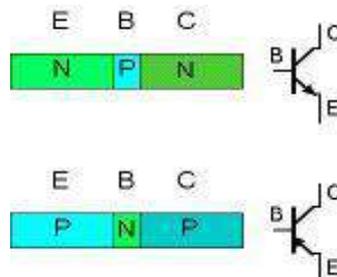
### 3.5 Transistor (Triode semi konduktor ).

Transistor adalah alat semikonduktor yang dipakai sebagai penguat, sebagai sirkuit pemutus dan penyambung (switching), stabilisasi tegangan, modulasi sinyal atau sebagai fungsi lainnya. Transistor dapat berfungsi semacam kran listrik, dimana berdasarkan arus inputnya (BJT) atau tegangan inputnya (FET), memungkinkan pengaliran listrik yang sangat akurat dari sirkuit sumber listriknya.



Gambar 3.8. Transistor through-hole (dibandingkan dengan pita ukur sentimeter).

Transistor merupakan dioda dengan dua sambungan (*junction*). Sambungan itu membentuk transistor PNP maupun NPN. Ujung-ujung terminalnya berturut-turut disebut emitor, base dan kolektor. Base selalu berada di tengah, di antara emitor dan kolektor. Transistor ini disebut transistor bipolar, karena struktur dan prinsip kerjanya tergantung dari perpindahan elektron di kutup negatif mengisi kekurangan elektron (hole) di kutup positif. **(William Shockley pada tahun 1951)** adalah seseorang yang pertama kali menemukan transistor bipolar.

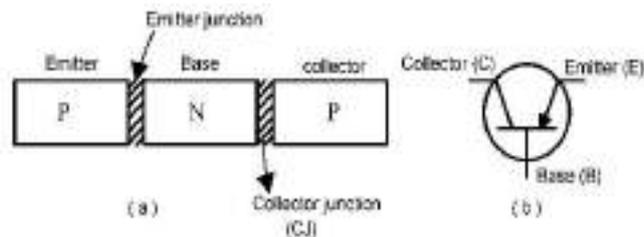


Gambar 3.9 .Transistor NPN dan PNP.

Pada umumnya, transistor memiliki 3 terminal. Tegangan atau arus yang dipasang di satu terminalnya mengatur arus yang lebih besar yang melalui 2 terminal lainnya. Transistor adalah komponen yang sangat penting dalam dunia elektronik modern. Dalam rangkaian analog, transistor digunakan dalam amplifier (penguat). Rangkaian analog melingkupi pengeras suara, sumber listrik stabil, dan penguat sinyal radio. Dalam rangkaian – rangkaian digital, transistor digunakan sebagai saklar berkecepatan tinggi. Beberapa transistor juga dapat dirangkai sedemikian rupa sehingga berfungsi sebagai logic gate, memori, dan komponen-komponen lainnya. Ada dua jenis triode semi konduktor, yaitu :

- Jenis PNP
- Jenis NPN

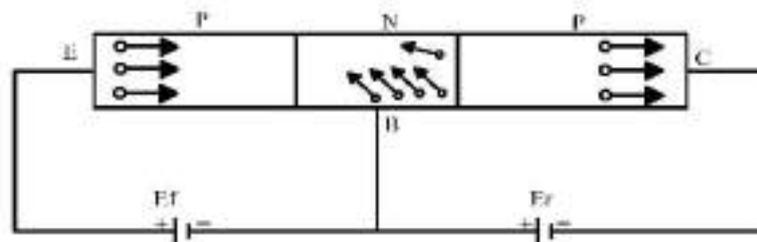
### 3.5.1 Transistor jenis PNP



Gambar 3.10

Transistor jenis PNP (a) PNP junction transistor (b) symbol transistor jenis PNP

Peristiwa yang terjadi pada PNP Junction transistor



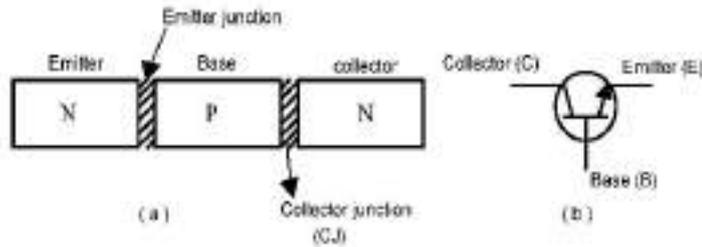
Gambar 3.11

Keadaan fisis PNP junction transistor

Pada gambar 3.11 (menghantar), maka pada junction Emitter (E) terjadi kombinasi secara terus – menerus selama  $E_f$  masih dipasang. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya arus basis dan arus emitter. Hole yang berada di Emitter akan mengalir ke Basis, sebagian kecil akan berkombinasi dengan elektron Basis dan sebagian besar akan ditarik ke daerah Collector (C) setelah melewati junction Collector. Hal ini dapat terjadi karena antara basis dan Colector dipasang tegangan dengan arah menentang (reverse bias). Akibat pemasangan ini, maka hole yang telah melewati junction colector dengan adanya bantuan dari medan listrik (negatip pada collector), sehingga timbullah arus collector.

Dengan peralatn ini dapatlah kita tarik suatu kesimpulan, bahwa pengerasan dapat terjadi karena arus collector tergantung atau dapat diatur oleh arus Emitter. Hal ini sesuai dengan kerja dari tabung electron, hanya saja disini pembawa listriknya adalah hole.

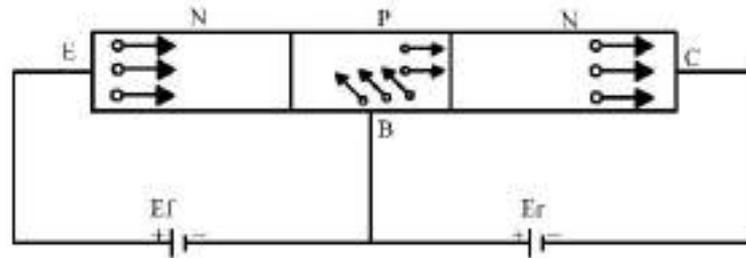
### 3.5.2 Transistor jenis NPN



Gambar 3.12

Transistor jenis NPN (a) NPN junction transistor (b) symbol transistor jenis NPN

Peristiwa yang terjadi pada NPN Transistor



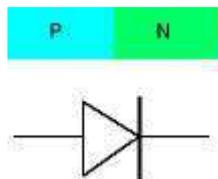
Gambar 3.13

Kadaan fisis NPN junction transistor

Pada junction Emitter akan terjadi rekombinasi terus – menerus selama emitter dan Base diberi tegangan  $E_f$  (forward bias), hal ini akan menghasilkan arus basis. Pada Collector-Base dipasang tegangan dengan arah menentang (reverse bias) sebesar  $E_r$ , akibatnya pada junction Collector akan terjadi medan listrik negative pada wilayah P dan positif pada wilayah N. dengan demikian sisa elektron yang asalnya dari Emitter akan dapat menembus wilayah Collector. Disini pembawa listriknya adalah electron.

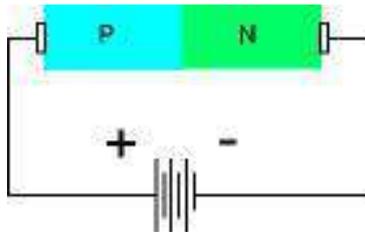
### 3.5.3 Dioda.

Jika dua tipe bahan semikonduktor ini dilekatkan—pakai lem barangkali ya :), maka akan didapat sambungan P-N (*p-n junction*) yang dikenal sebagai dioda. Pada pembuatannya memang material tipe P dan tipe N bukan disambung secara harfiah, melainkan dari satu bahan (*monolithic*) dengan memberi doping (*impurity material*) yang berbeda.



gambar 3.14. simbol sambungan p-n

Jika diberi tegangan maju (*forward bias*), dimana tegangan sisi P lebih besar dari sisi N, elektron dengan mudah dapat mengalir dari sisi N mengisi kekosongan elektron (*hole*) di sisi P.



Gambar 3.15 . forward bias.

Sebaliknya jika diberi tegangan balik (*reverse bias*), dapat dipahami tidak ada elektron yang dapat mengalir dari sisi N mengisi hole di sisi P, karena tegangan potensial di sisi N lebih tinggi. Dioda akan hanya dapat mengalirkan arus satu arah saja, sehingga dipakai untuk aplikasi rangkaian penyearah (*rectifier*). Dioda, Zener, LED, dan Varactor.

#### Dioda Bertegangan Tinggi (*High Voltage Diodes*)

Menyediakan jajaran produk dioda daya yang serbaguna termasuk tipe dioda kaca dengan keandalan yang tinggi, perangkat pelindung tekanan tegangan (*surge suppression*) untuk melindungi peralatan elektronik (terutama dalam aplikasi otomotif) dan jenis bertegangan tinggi untuk pengoperasian tampilan pada frekuensi tinggi. Tersedia dalam bentuk *axial lead*, *press-fit* dan paket pemasangan permukaan (*surface mount*).

### 3.6 Bahan – bahan semi konduktor

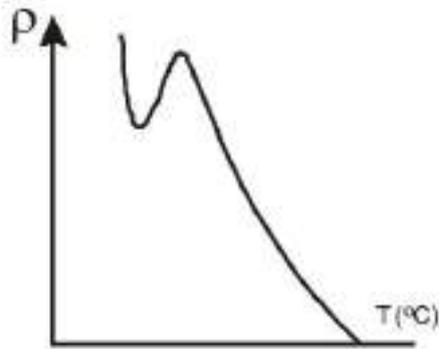
Bahan – bahan yang dipergunakan sebagai bahan semi konduktor adalah sebagai berikut :

#### 3.6.1 Germanium

Germanium merupakan salah satu bahan semi konduktor yang banyak dipergunakan sampai saat ini dalam teknik elektro. Germanium diperoleh sebagai serbuk berwarna kelabu mealalui proses kimia, yaitu dengan mereduksi Germanium oksida. Selain itu juga dapat diperoleh dari pemurnian Cadmium dan Seng. Germanium adalah bahan semi konduktor yang bervalensi 3 dan mempunyai susunan seperti Karbon dan Silikon.

Spesifikasi dari Germanium :

- Berat atom	: 72,6
- Volume atom	: 13,5
- Berat jenis	: 5,3
- Hantaran panas	: 0,14 Cal/Cm dt °C
- Kapasitas panas (0 – 100 °C)	: 0,08 x Cal/gr oC
- Koefisien muai panjang (0 – 100 °C)	: $6,0 \times 10^{-6}$
- Titik lebur	: 936 °C
- Permittivitas	: 16
- Tahanan jenis listrik pada 20 °C ( $\rho$ )	: 0,47 ohm m
Sebagai perbandingan $\rho_{cu}$	: $1,7 \times 10^{-8}$ Ohm m
	: $9 \times 10^{-14}$ Ohm m



Gambar 3.16  
Karakteristik tahanan jenis sebagai fungsi dari temperatur bahan germanium

Dari gambar 3.16 diatas terlihat bahwa pada temperature yang rendah bahan semi konduktor bersifat sebagai isolator, kemudian pada suhu yang cukup tinggi, bahan ini berubah sifatnya menjadi bahan penghantar yang baik.

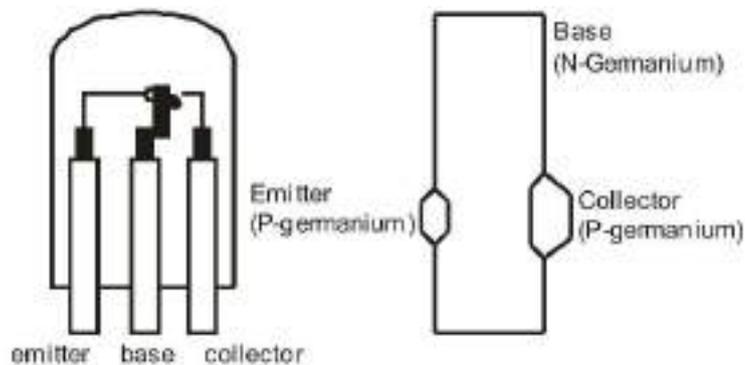
#### Penggunaan Germanium

Germanium merupakan bahan yang sangat luas pemakaiannya didalam pembuatan rectifier (alat penyearah arus) dan transistor serta semi konduktor yang lain.

#### 3.6.2. P – Germanium dan N - Germanium

Germanium yang bercampur dengan Arsen (As) disebut “ N Germanium”. N artinya negative, karena pada temperature kamar Germanium tipe N ini mempunyai banyak elektron bebas yang bermuatan negatif. Arsen yang memberikan sebuah elektron disebut donor. Germanium yang dicampur dengan Indium (In) yang mempunyai 3 elektron pada kulit atom terluar disebut “ P Germanium”. P artinya positif dan menunjukkan bahwa banyak sekali hole yang bermuatan positif yang ada dalam Germanium tipe P ini.

#### 3.6.3. Germanium untuk transistor



Gambar 3.17 PNP Transistor

Emitter (E) dan Colector (C) dibentuk dengan meletakkan butir kecil Indium pada tiap sisi pelat, kemudian dipanaskan sampai Indium meleleh, indium yang meleleh sedikit demi sedikit mengadakan penetrasi terhadap Germanium dengan kata lain pada titik ini terjadi campuran antara Indium dan Germanium.

Tipisnya lapisan base (N Germanium) diantara Collector dan Emitter tergantung dari temperature dan lamanya proses pemanasan yang lama. Indium menetrasi Germanium lebih lama.

#### 3.6.4. Germanium sebagai diode

Apabila P Germanium dan N Germanium digabung menjadi satu menjadi sebuah diode. Diode antara lain dipergunakan sebagai penyearah arus.

### 3.7. Silikon

Silikon (Si) tidak ditemukan dalam bentuk aslinya, akan tetapi ditemukan dalam bentuk Silika yang di reduksi dengan Cokes dan kemudian dimurnikan dengan converter, menghasilkan  $\text{SiO}_4$  atau  $\text{SiHCL}_3$  atau dengan proses berulang – ulang didestilasi dan kemudian direduksi dengan Hidrogen menghasilkan  $\text{SiH}_4$ .

Sifat – sifat silicon :

- Mempunyai mobilitas yang tinggi.
- Konstante dielektriknya kecil.
- Konduktivitas thermis yang besar.
- Disipasi panas yang baik.
- Impurity ionization energi yang sangat kecil.

Penggunaan :

Dari sifat – sifat Silikon tersebut diatas, maka Silikon banyak digunakan pada pembuatan bahan semi konduktor.

- Digunakan sebagai rectifier diode.
- Thyristor (Silikon control rectifier)
- Dan lain – lain.

Senyawa – senyawa dari Silikon :

- $\text{SiO}_3$  (quartz) dipergunakan pada alat – alat optic dengan index bias 1,544.
- $\text{Na}_3 \text{Si}_3$  (kaca)
- Si C (Silicon Carbide)
- $\text{K Al}_3 \text{Si}_3 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$  (mika)

Silikon dan senyawa Silikon banyak dipergunakan dalam industri alat – alat listrik dan bidang elektronik, terutama pada pembuatan semi konduktor.

### 3.8 Macam – macam Semikonduktor dan Penggunaannya.

No	Nama SemiKonduktor	Penggunaannya
1	Barium Titanate (Ba Ti)	Termistor (PTC)
2	Bismut Telurida (Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> )	Konversi termo elektrik
3	Cadmium sulfide (Cd S)	Sel Fotokonduktif
4	Gallium arsenide (Ga As)	Dioda, transistor, laser, led, generator gelombang Mikro
5	Germanium (Ge)	Diode, transistor
6	Indium antimonida (In Sb)	Magnetoresistor, piezoresistor, detektor radiasi inframerah
7	Indium arsenida (In As)	Piezoresistor
8	Silikon (Si)	Diode, transistor, IC
9	Silikon Carbida (Si Cb)	Varistor
10	Seng Sulfida (Zn S)	Perangkat penerangan elektro
11	Germanium Silikon (Ge Si)	Pembangkitan termoelektrik
12	Selenium (Se)	Rectifier
13	Aluminium Stibium (Al Sb)	Diode penerangan
14	Gallium pospor (Ga P)	Diode penerangan
15	Indium pospor (In P)	Filter inframerah
16	Tembaga Oksida	Rectifier
17	Plumbun Sulfur (Pb S)	Foto sel
18	Plumbun Selenium (Pb Se)	Foto sel
19	Indium Stibium (In Sb)	Detektor inframerah, filter inframerah, generator Hall

### 3.9 Aplikasi Semikonduktor.

Pemanfaatan Lapisan Semikonduktor Sebagai Detektor Kualitas Daging Untuk mencegah cepatnya proses pembusukan (hilangnya kesegaran) oleh bakteri pembusuk ini, biasanya daging diawetkan, dengan cara menyimpan daging pada suhu rendah, di mana bakteri tidak melakukan aktivitas dan berkembang. Permasalahannya, sejauh ini belum ada studi tentang batas suhu dimana bakteri tidak aktif melakukan proses penguraian / pembusukan. Kebiasaan yang aman dilakukan adalah menyimpan pada suhu beku. Padahal pendinginan yang sangat rendah memerlukan energi listrik yang besar / biaya yang tinggi. Di samping itu pemanfaatan daging beku tidak segera bisa dilakukan, dan mungkin cita-rasa daging setelah dibekukan tidak sama dengan daging yang tanpa pembekuan. Oleh karena itu, dibutuhkan studi tentang suhu optimal proses pengawetan daging tanpa beku, dimana bakteri tidak aktif, dan studi tentang kondisi kesegaran daging, baik setelah pengawetan maupun setelah pemotongan. Untuk itu diperlukan alat (sensor) untuk mendeteksi ambang perubahan kualitas daging segar menuju pembusukan. Dengan kata lain, alat yang mampu mendeteksi ethil-asetat, pada konsentrasi yang sangat rendah. Pada makalah ini akan dijelaskan proses pembuatan sensor untuk mendeteksi gas ethil-asetat. Sensor dibuat dari bahan semikonduktor padatan SnO<sub>2</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan metoda lapisan tebal pada substrat alumina.

Usaha untuk membuat sensor penciuman atau sensor aroma sebagai hidung elektronik (electronic noses) telah dilakukan sejak ditemukannya teknologi lapisan semikonduktor untuk mendeteksi gas-gas yang menimbulkan bau. Electronic nose memiliki syarat-syarat yang baik untuk digunakan sebagai sensor kimia untuk mendeteksi aroma yaitu:

1. dapat digunakan berkali-kali (tidak sekali pakai)
2. simpel, karena dimensinya kecil dalam orde mm
3. tidak merusak

Dalam proses pembusukan daging terjadi berbagai reaksi kimia akibat penguraian bakteri. Salah satu gas yang dihasilkan dalam jumlah cukup besar adalah gas etil asetat (CH<sub>3</sub>COOC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>). Gas inilah yang diharapkan akan terdeteksi oleh sensor gas.

#### 3.9.1. Sifat elektrik bahan semikonduktor

Sensor dari bahan semikonduktor yang terbuat dari logam merupakan oksida logam. Oksida logam tersebut dibedakan berdasarkan sifatnya yaitu tipe-n dan tipe-p. Tipe-n lebih banyak digunakan karena lebih stabil pada gas ambien. La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> merupakan semikonduktor tipe-n yang memiliki distribusi elektron yang memenuhi tingkat energi dibawah energi Fermi. Tingkat energi Fermi yang terletak dalam celah energi membatasi kedudukan elektron dalam semikonduktor. Karena celah kecil antara tingkat energi Fermi dengan pita konduksi, elektron elektron mudah untuk melompat menuju pita konduksi.

Semikonduktor organik telah menjadi perhatian dalam dunia penelitian sejak 50 tahun yang lalu. Bahan organik dengan kandungan karbon, hidrogen dan oksigen, telah menarik perhatian para peniliti, karena ikatan antar molekul yang lemah dalam keadaan solid, dapat menjadikan bahan organik sebagai bahan insulator dan semiconductor. Akhir-akhir ini diketahui juga bahwa bahan organik semiconductor bersifat photoconductive dibawah sinar biasa. Penemuan ini menarik perhatian industri untuk aplikasi dalam electrophotography dan tabung sinar dalam LCD (Liquid Crystal Display).

Penelitian organik LED (Light Emitting Diode) (OLED) mulai mendapat perhatian sejak research group dari Eastman Kodak melaporkannya tahun 1987 dengan molekul kecil sebagai bahannya, kemudian di susul dengan peniliti dari Cambridge University pada tahun 1990, dengan menggunakan polymer sebagai bahannya. Selain aplikasi dalam OLED, aplikasi untuk pembuatan transistor juga mendapat perhatian. Salah satu devaisnya adalah organic thin film transistor (OTFT). Walau kecepatan OTFT ini tidaklah dapat menyaingi transistor dalam silicon, aplikasi dalam smart card yang ramah lingkungan tengah dikembangkan oleh beberapa perusahaan elektronik raksasa.

Soal latihan :

1. Apa yang dimaksud dengan bahan semi konduktor jelaskan dengan menggunakan diagram pita energi.
2. Jelaskan proses pada bahan semi konduktor.
3. Terangkan sifat fisis dari bahan semi konduktor
4. Terangkan sifat ikatan atom yang terdapat pada bahan semi konduktor
5. Bagaimana pengaruh cahaya/panas terhadap bahan semikonduktor
6. Jelaskan apa yang dimaksud dengan bahan semikonduktor intrinsic semikonduktor
7. Jelaskan apa yang dimaksud dengan bahan semikonduktor extrinsic semikonduktor
8. Bagaimana cara mendapatkan bahan transistor tipe N dan tipe P
9. Sebutkan spesifikasi bahan germanium
10. Sebutkan macam-macam bahan semikonduktor beserta penggunaannya.



## **BAB IV**

### **BAHAN PENYEKAT**

Tujuan Instruksional : Mahasiswa dapat mengerti dan memahami tentang definisi dari bahan penyekat, sifat bahan penyekat, yang meliputi sifat mekanis dan sifat listrik dari bahan penyekat, sifat mekanis meliputi kekuatan tarik dan kekuatan tekan, dan untuk sifat listrik meliputi nilai tahanan, kekuatan dielektris, rugi dielektris, kuat hantar panas dan kuat hantar arus, pembagian jenis bahan penyekat yaitu bahan penyekat gas, cair dan padat, untuk penyekat bahan gas seperti gas SF<sub>6</sub>, nitrogen, hidrogen, udara, bahan penyekat cair seperti minyak trafo, minyak kabel, serta bahan penyekat padat seperti bahan porselen, keramik, mika, kaca, serta bahan plastik seperti polimer. pada bab ini juga mahasiswa dapat memahami klasifikasi bahan penyekat berdasar kenaikan temperatur menurut standar internasional (IEC)

#### **4. Pendahuluan.**

Dalam menentukan dimensi suatu sistem isolasi, dibutuhkan pengetahuan yang pasti mengenai jenis, besaran dan durasi tekanan elektrik yang akan dialami bahan isolasi tersebut, dan disamping itu juga perlu untuk mempertimbangkan kondisi sekitar dimana isolasi akan ditempatkan. selain itu, perlu juga untuk mengetahui sifat-sifat dari bahan isolasi sehingga dapat dipilih bahan-bahan yang tepat untuk suatu sistem isolasi, dengan demikian akan dihasilkan suatu rancangan yang paling ekonomis.

Fungsi yang penting dari suatu bahan isolasi adalah:

1. Untuk mengisolasi antara suatu penghantar dengan penghantar lainnya. Misalnya antara konduktor fasa dengan konduktor fasa lainnya, atau konduktor fasa dengan tanah.
2. Untuk menahan gaya mekanis akibat adanya arus pada konduktor yang diisolasi,
3. Mampu menahan tekanan yang diakibatkan panas dan reaksi kimia.

Tekanan yang diakibatkan oleh medan listrik, gaya mekanik, thermal dan reaksi kimia dapat saja terjadi serentak, sehingga perlu diketahui efek bersama dari semua parameter tersebut, dengan kata lain suatu bahan isolasi dinyatakan ekonomis jika bahan tersebut dapat menahan semua tekanan tersebut dalam jangka waktu yang lama.

Sifat dan karakteristik bahan pada saat digunakan dalam sistem tenaga listrik mempunyai besaran yang sangat bervariasi mulai dari sifat fisik, mekanik maupun elektrik. Yang semuanya sangat berperan guna menganalisis karakteristik sistem secara keseluruhan. Salah satu sifat yang sangat penting adalah sifat kelistrikan. Namun demikian sifat mekanis, sifat termal, ketahanan terhadap bahan kimia serta sifat-sifat lainnya perlu juga diperhatikan. Salah satu bahan listrik yang sangat luas penggunaannya dalam sistem tenaga listrik adalah isolasi. Karena seperti kita tahu bahan isolasi akan menyekat antara bagian-bagian yang bertegangan dengan yang tidak atau dengan manusia

#### **4.1. Pengertian Bahan Penyekat**

Bahan penyekat adalah bahan yang mempunyai sifat mengisolir arus listrik, artinya mempunyai tahanan listrik yang besar sekali. Umumnya terdiri dari bahan – bahan organik dan anorganik yang diperoleh dari proses kimia.



Gambar 4.1  
Diagram pita energi bahan isolator

Sesuai dengan yang telah dijelaskan pada Bab I, bahan penyekat merupakan bahan yang susunan atomnya sedemikian supa sehingga elektron sulit berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Hal ini disebabkan karena celah energinya besar sekali.

Agar elektron yang terdapat pada pita valensi dapat berpindah ke pita konduksi, diperlukan energi luar yang besarnya melebihi energi gapnya.

Pada saat energi luar lebih besar sedikit saja terhadap energi gap, maka akan terjadi perpindahan elektron dari pita valensi ke pita konduksi, dengan perkataan lain tegangan tembus (breakdown voltage).

Bahan penyekat atau sering disebut dengan istilah *isolasi* adalah suatu bahan yang digunakan dengan tujuan agar dapat memisahkan bagian – bagian yang bertegangan atau bagian – bagian yang aktif. Sehingga untuk bahan penyekat ini perlu diperhatikan mengenai sifat – sifat dari bahan tersebut yang meliputi : sifat listrik, sifat mekanis, sifat termal, ketahanan terhadap bahan kimia dan lain – lain.

Bahan penyekat digunakan untuk memisahkan bagian – bagian yang beregangan. Untuk itu pemakaian bahan penyekat perlu mempertimbangkan sifat kelistrikannya. Disamping itu juga perlu mempertimbangkan sifat – sifat bahan penyekat tersebut.

Sifat kelistrikan mencakup resistivitas, permitivitas, dan kerugian dielektrik. Penyekat membutuhkan bahan yang mempunyai resistivitas yang besar agar arus yang bocor sekecil mungkin (dapat diabaikan). Yang perlu diperhatikan disini adalah bahwa bahan isolasi yang higroskopis hendaknya dipertimbangkan penggunaannya pada tempat – tempat yang lembab karena resistivitasnya akan turun. Resistivitas juga akan turun jika tegangan yang diberikan naik.

Besarnya kapasitansi bahan isolasi yang berfungsi sebagai dielektrik ditentukan oleh permitivitasnya, disamping jarak dan luas permukaannya. Besarnya permitivitas udara adalah 1,00059, sedangkan untuk zat padat dan zat cair selalu lebih besar dari itu. Apabila bahan isolasi diberi tegangan bolak – balik maka akan terdapat energi yang diserap oleh bahan tersebut. Besarnya kerugian energi yang diserap bahan isolasi tersebut berbanding lurus dengan tegangan, frekuensi, kapasitansi, dan sudut kerugian dielektrik. Sudut tersebut terletak antara arus kapasitif dan arus total ( $I_c + I_r$ ).

Suhu juga berpengaruh terhadap kekuatan mekanis, kekerasan, viskositas, ketahanan terhadap pengaruh kimia dan sebagainya. Bahan isolasi dapat rusak diakibatkan oleh panas pada kurun waktu tertentu. Waktu tersebut disebut umur panas bahan isolasi. Sedangkan kemampuan bahan menahan suhu tertentu tanpa terjadi kerusakan disebut *ketahanann panas*. Menurut IEC (*International Electrotechnical Commission*) didasarkan atas batas suhu kerja bahan, bahan isolasi yang digunakan pada suhu dibawah nol (misal pada pesawat terbang, pegunungan) perlu juga diperhitungkan karena pada suhu dibawah nol bahan isolasi akan menjadi keras dan regas.

Pada mesin – mesin listrik, kenaikan suhu pada penghantar dipengaruhi oleh resistansi panas bahan isolasi. Bahan isolasi tersebut hendaknya mampu meneruskan panas yang didisipasikan oleh penghantar atau rangkaian magnetik keudara sekelilingnya.

Kemampuan larut bahan isolasi, resistansi kimia, higroskopis, permeabilitas uap, pengaruh tropis, dan resistansi radio aktif perlu dipertimbangkan pada penggunaan tertentu. Kemampuan larut diperlukan dalam menentukan macam bahan pelarut untuk suatu bahan dan dalam menguji kemampuan bahan isolasi terhadap cairan tertentu selama diimpregnasi atau dalam pemakaian. Kemampuan larut bahan padat dapat dihitung berdasarkan banyaknya bagian permukaan bahan yang dapat larut setiap satuan waktu jika diberi bahan pelarut. Umumnya kemampuan larut bahan akan bertambah jika suhu dinaikkan. Ketahanan terhadap korosi akibat gas, air, asam, basa dan

garam bahan isolasi juga bervariasi antara satu pemakaian bahan isolasi di daerah yang konsentrasi kimianya aktif, instalasi tegangan tinggi, dan suhu di atas normal.

Uap air dapat memperkecil daya isolasi bahan. Karena bahan isolasi juga mempunyai sifat higroskopis maka selama penyimpanan atau pemakaian diusahakan agar tidak terjadi penyerapan uap air oleh bahan isolasi, dengan memberikan bahan penyerap uap air, yaitu senyawa  $P_2O_5$  atau  $CaCl_2$ . Bahan yang molekulnya berisi kelompok hidroksil (OH) higroskopitasnya relatif besar dibanding bahan parafin dan polietilin yang tidak dapat menyerap uap air. Bahan isolasi hendaknya juga mempunyai permeabilitas uap (kemampuan untuk dilewati uap) yang besar, khususnya bagi bahan yang digunakan untuk isolasi kabel dan rumah kapasitor.

Di daerah tropis basah dimungkinkan tumbuhnya jamur dan serangga. Suhu yang tinggi yang disertai kelembaban dalam waktu lama dapat menyebabkan turunnya kemampuan isolasi. Oleh karena bahan isolasi hendaknya dilapisi bahan anti jamur (paranitro phenol, dan phenta chloro phenol).

Pemakaian bahan isolasi sering dipengaruhi bermacam – macam energi radiasi yang berpengaruh dan mengubah sifat bahan isolasi. Radiasi sinar matahari mempengaruhi umur bahan, khususnya jika bersinggungan dengan oksigen. Sinar ultra violet dapat merusak beberapa bahan organik, yaitu kekuatan mekanik dan elastisitas. Sinar X sinar – sinar dari reaktor nuklir, partikel – partikel radio isotop juga mempengaruhi kemampuan bahan isolasi.

Sifat mekanis bahan kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan derajat kekerasan bahan isolasi juga menjadi pertimbangan dalam memilih suatu jenis bahan isolasi.

#### **4.2. Sifat – sifat bahan penyekat.**

Ada beberapa sifat bahan penyekat yang perlu kita ketahui sebagai dasar pemahaman kita tentang bahan penyekat. Sifat – sifat tersebut meliputi sifat listrik, sifat mekanis, sifat termis dan sifat kimia.

##### **a) Sifat Listrik.**

Sifat listrik yaitu suatu bahan yang mempunyai tahanan jenis listrik yang besar agar dapat mencegah terjadinya rambatan atau kebocoran arus listrik antara hantaran yang berbeda tegangan atau dengan tanah. Sifat listrik, meliputi tahanan isolasi, kapasitas, kekuatan dielektrik, kerugian sudut dielektrik, dan lain – lain. Karena pada kenyataannya sering terjadi kebocoran, maka harus dibatasi sampai sekecil-kecilnya agar tidak melebihi batas yang ditentukan oleh peraturan yang berlaku ( PUIL : peraturan umum instalasi listrik).

##### **b) Sifat Mekanis.**

Sifat mekanis, meliputi kekuatan tarik, tekan, kekerasan dan kerapuhan. Mengingat sangat luasnya pemakaian bahan penyekat, maka perlu dipertimbangkan kekuatannya supaya dapat dibatasi hal-hal penyebab kerusakan karena akibat salah pemakaian. Misal memerlukan bahan yang tahan terhadap tarikan, maka dipilih bahan dari kain bukan dari kertas karena kain lebih kuat daripada kertas.

##### **c) Sifat Termis.**

Sifat panas, meliputi ketahanan terhadap panas, koefisien muai dan lain – lain, Panas yang timbul pada bahan akibat arus listrik atau arus gaya magnet berpengaruh kepada penyekat termasuk pengaruh panas dari luar sekitarnya. Apabila panas yang terjadi cukup tinggi, maka diperlukan pemakaian penyekat yang tepat agar panas tersebut tidak merusak penyekatnya.

##### **d) Sifat Kimia.**

Sifat kimia, meliputi kestabilan bahan, ketahanan terhadap asam dan basa, korosi dan lain – lain, akibat panas yang cukup tinggi dapat mengubah susunan kimianya, begitu pula kelembaban udara atau basah disekitarnya. Apabila kelembaban dan keadaan basah tidak dapat dihindari, maka harus memilih bahan penyekat yang tahan air, termasuk juga kemungkinan adanya pengaruh zat-zat yang merusak seperti : gas, asam, garam, alkali, dan sebagainya.

Berdasarkan karakteristik dan sifat – sifat bahan penyekat dapat dianalisa berdasarkan 4 macam sifat :

#### **4.2.1 Sifat Listrik**

##### **4.2.1.1 Tahanan isolasi**

Tujuan utama dari bahan isolasi adalah untuk mencegah mengalirnya arus keluar dari konduktor apabila tegangan listrik diberikan padanya, oleh karena itu bahan isolasi harus mempunyai tahanan listrik yang besar. Akan tetapi pada kenyataannya semua bahan isolasi akan mengalami arus bocor.

Persamaan arus bocor :

$$V = I_i \cdot R_i$$

$$I_i = \frac{V}{R_i} \dots\dots\dots (4.1)$$

Di mana :

$$I_i = \text{Arus bocor} \quad (\text{Ampere})$$

$$R_i = \text{Tahanan isolasi} \quad (\text{Ohm})$$

$$V = \text{Tegangan ker ja} \quad (\text{Volt})$$

Pada bahan isolasi arus bocor  $I_i$  relative sangat kecil bila dibandingkan dengan arus yang melewati penghantarnya.

Ada dua kemungkinan jalannya arus bocor :

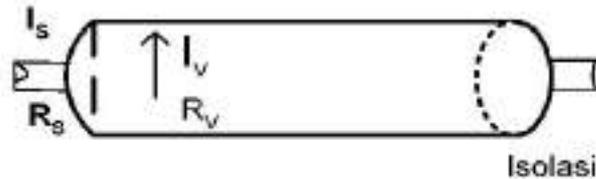
- Melalui bahan isolasi.
- Melalui permukaan isolasi.

Ada dua macam tahanan isolasi :

- Tahanan isolasi yang disebabkan oleh tahanan dalam  $R_v$  (volume resistance)
- Tahanan yang disebabkan oleh tahanan permukaan  $R_s$  (surface resistance).

$R_v$  tergantung dari bahan isolasi yang dipakai dan dinyatakan dalam Ohm cm. sedangkan  $R_s$  tergantung pada lapisan luar konduktor serta keadaan udara disekeliling isolasi penghantar, misalnya kelembaman.

Untuk jelasnya dapat diuraikan dari penjelasan berikut :



Gambar 4.2 Penampang kabel membusur

Persamaan arus bocor :

$$I_i = I_s + I_v$$

Di mana :

$$I_i = \text{Arus bocor}$$

$$I_s = \text{Arus permukaan}$$

$$I_v = \text{Arus yang melewati bahan isolasi}$$

Persamaan tahanannya :

$$R_1 = \frac{R_s \cdot R_v}{R_s + R_v}$$

Dimana  $R_1$  adalah tahanan arus bocor

Harga tahanan isolasi suatu penghantar :

- Untuk kayu-asbes :  $10^4 - 10^9$  Ohm Cm.
- Untuk mika-hidrokarbon :  $10^{16} - 10^{19}$  Ohm Cm

Apabila tegangan yang bekerja pada bahan isolasi bertambah besar, maka ketahanan isolasi akan berkurang.

Bila ada 2 buah lempeng elektrode dengan jarak 1 Cm pada selisih tegangan 30 Kv, maka akan terjadi arus listrik (2 lempeng tersebut berada dalam udara kering). Dan bila di antara dua lempeng tersebut diselipkan lempeng gelas, maka baru pada tegangan 1000 Kv arus listrik akan mengalir pada lempeng gelas tersebut.

Pada sistem tegangan bolak – balik dengan frekuensi tinggi, ternyata tegangan tembusnya lebih rendah. Suatu bahan penyekat tertentu, misalnya katun, linen dan kertas merupakan bahan penyekat yang dapat menyerap air (higrokopis). Agar bahan tersebut dapat dicelupkan kedalam bahan isolasi cair, maka bahan – bahan tersebut dicelupkan kedalam bahan isolasi cair, yang akan mendesak udara keluar dari pori – porinya, hal yang demikian disebut “impregnir”.

**4.2.1.2. Kapasitas**

Setiap bahan isolasi, akan mempunyai kapasitas listrik yang tergantung pada jenis dielektrik yang digunakan.

Kapasitas suatu bahan isolasi dapat dinyatakan dalam rumus :

$$C : \frac{10^{-9}}{36} \cdot \epsilon \cdot \frac{A}{h} \dots\dots\dots (4.2)$$

Dimana :

- C : Kapasitas (Farad)
- A : Luas penampang (Cm)
- h : Jarak antara tepi dengan tepi/tebal dielektrik (Cm)
- $\epsilon$  : Koefisien dielektrik

$\epsilon_{udara} : 1,00058$

$\epsilon_{hampa} : 1$

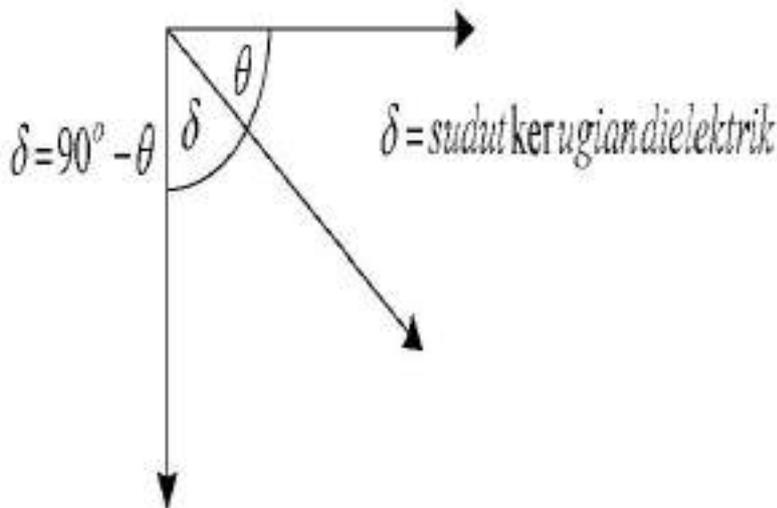
$$\epsilon_0 : \frac{10^{-9}}{36} : 8,89 \times 10^{-12}$$

Koefisien dielektrik suatu bahan isolasi adalah kesanggupan bahan tersebut untuk membentuk kapasitas panas.

**4.2.1.3 Kerugian sudut dielektrik.**

Apabila suatu bahan isolasi dikenai tegangan bolak – balik, maka dalam bahan isolasi tersebut akan mengambil energi dalam bentuk panas. Adapun energi yang diambil tersebut dalam satuan waktu disebut kerugian dielektrik.

Sedangkan bila tidak terdapat kerugian dielektrik, maka pergeseran sudut fasa antara tegangan dan arus yang melalui isolasi adalah tepat  $90^\circ$  . Akan tetapi kerugian dielektrik dari semua bahan isolasi tak dapat dihindari, sehingga pergeseran sudut fase antara tegangan dan arus tidak tepat  $90^\circ$  , tetapi kurang dari harga tersebut.



Gambar 4.3 Sudut kerugian dielektrik

Dari perhitungan secara empiris diperoleh :

$$P = V^2 2 f C \tan \dots\dots\dots(4.3)$$

Di mana :

- $P = \text{Kerugian dielektrik}$  (Watt)
- $V = \text{Tegangan operasi}$  (Volt)
- $f = \text{Frerkuensi}$  (Hertz)
- $C = \text{Kapasi tan si}$  (Farad)
- $\tan = \text{Sudut ke rugian dielektrik}$  (derajat)

Kerugian dielektrik persatuan luas dari dielektrik:

$$P = E^2 \cdot f \cdot \frac{C \tan}{1,8 \times 10^{12}} \dots\dots\dots (4.4)$$

Di mana :

- $P = \text{kerugian dielektrik persatuan luas}$  (Watt / Cm<sup>2</sup>)
- $E = \text{Intensitas medan listrik pada suatu tempat tertentu dari bahan isolasi}$  (Volt / Cm)

**4.2.1.4. Kekuatan Dielektrik.**

Suatu tahanan isolasi tidak dapat menahan tegangan yang tingginya tak terhingga tanpa mengalami kerusakan, yang akhirnya akan diikuti oleh hubung singkat diantara bagian – bagian yang menghantarkan arus.

Apabila arus yang terjadi cukup besar, maka suatu busur api akan kelihatan pada tempat terjadinya “breakdown” yang dapat mengakibatkan mencairnya bagian isolasi pada tempat yang bersangkutan.

Kesanggupan bahan isolasi untuk menahan terjadinya breakdown dinamakan kekuatan dielektrik dari bahan isolasi, dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut :

$$V_{br} : E_{br} \cdot h \dots\dots\dots (4.5)$$

Di mana :

- $V_{br} : \text{Tegangan break down}$  (Kv)
- $E_{br} : \text{Intesitas breakdown}$  (Kv / mm)
- $h : \text{Tebal isolasi}$  (mm)

**4.3. Sifat mekanis**

yaitu perubahan bentuk dari suatu benda padat akibat adanya gaya-gaya dari luar yang bekerja pada benda tersebut. Jadi adanya perubahan itu tergantung kepada besar kecilnya gaya, bentuk benda, dan dari bahan apa benda tersebut dibuat. Jika tidak ada gaya dari luar yang bekerja, maka ada tiga kemungkinan yang akan terjadi pada suatu benda :

- Bentuk benda akan kembali ke bentuk semula, hal ini karena benda mempunyai sifat kenyal (elastis)
- Bentuk benda sebagian saja akan kembali ke bentuk semula, hal ini hanya sebagian saja yang dapat kembali ke bentuk semula karena besar gaya yang bekerja melampaui batas kekenyalan sehingga sifat kekenyalan menjadi berkurang.
- Bentuk benda berubah sama sekali, hal ini dapat terjadi karena besar gaya yang bekerja jauh melampaui batas kekenyalan sehingga sifat kekenyalan sama sekali hilang.

Kekuatan mekanis dari suatu bahan isolasi dan kesanggupannya untuk mengatasi tarikan – tarikan mekanis adalah sangat diperlukan dalam praktek.

Sifat – sifat mekanis yang perlu diperhatikan :

- Tegangan tarik / tekan yang tergantung dari factor / koefisien tegangan tarik / tekan tiap bahan isolasi.
- Kerapuhan/kekerasan bahan.

Pengujian sifat mekanis bahan perlu dilakukan untuk mendapatkan informasi spesifikasi bahan. Melalui pengujian tarik akan diperoleh besaran-besaran kekuatan tarik, kekuatan mulur, perpanjangan, reduksi penampang, modulus elastis, resilien, keuletan logam, dan lain-lain. Selain

sifat-sifat tersebut dengan tidak secara terlalu teknis, perlu diperhatikan kekerasan (hardness) dan kemampuan menahan goresan (abrasion). Contoh sifat fisis yang sering diperlukan adalah berat jenis, titik lebur, titik didih, titik beku, kalor lebur, dan sebagainya. Juga sifat perubahan volume, wujud, dan panjang terhadap perubahan suhu. Perkaratan adalah contoh sifat bahan akibat reaksi kimia; reaksi antara logam dengan oksigen yang ada di udara. Sifat kimia juga termasuk sifat bahan yang beracun, kemungkinan mengadakan reaksi dengan garam, asam, dan basa.

#### 4.4. Sifat thermis

Benda padat mempunyai bentuk yang tetap (bentuk sendiri), dimana pada suhu yang tetap benda padat mempunyai isi yang tetap pula. Isi akan bertambah atau memuai jika mengalami kenaikan suhu dan sebaliknya benda akan menyusut jika suhunya menurun. Karena berat benda tetap, maka kepadatan benda akan bertambah, sehingga dapat disimpulkan sebagai berikut :

- Jika isi (volume) bertambah (memuai), maka kepadatannya akan berkurang
- Jika isinya berkurang (menyusut), maka kepadatan akan bertambah
- Jadi benda lebih padat dalam keadaan dingin daripada dalam keadaan panas.

#### 4.5. Sifat kimia

Berkarat adalah termasuk sifat kimia dari suatu bahan yang terbuat dari logam. Hal ini terjadi karena reaksi kimia dari bahan itu sendiri dengan sekitarnya atau bahan itu sendiri dengan bahan cairan. Biasanya reaksi kimia dengan bahan cairan itulah yang disebut berkarat atau korosi. Sedangkan reaksi kimia dengan sekitarnya disebut pemburaman, tahanan isolasi dapat rusak/harganya turun karena air, garam, minyak dan lain – lain, yang akhirnya dapat memperpendek umur isolasi.

Beberapa sifat kimia yang perlu diperhatikan adalah :

- Chemical resistance, ketahanan terhadap korosi karena garam, asam, alkali, gas dan lain – lain.

#### 4.6. Pembagian bahan isolasi

Secara umum bahan isolasi dapat dibagi menjadi :

- Bahan isolasi yang bersifat gas.
- Bahan isolasi yang bersifat cair.
- Bahan isolasi yang bersifat padat.

##### 4.6.1 Bahan isolasi yang bersifat gas

Gas merupakan yang teringan, bentuk dan volumenya tergantung dimana ia berada, Isolator adalah salah satu komponen terpenting yang harus di ketahui dalam hal keelektronikaan. Isolator terbagi atas beberapa macam salah satunya yaitu isolator gas.

Pada umumnya isolator gas digunakan sebagai media isolasi dan penghantar panas. Beberapa hal yang perlu diperhatikan pada isolator gas ini adalah ketidakstabilan temperatur, ketidaknormalan sifat kedielektrikan pada tekanan yang tinggi dan resiko ledakan dari gas yang digunakan.

Berdasarkan kekuatan dielektrik, rugi-rugi dielektrik, stabilitas kimia, korosi, dll, isolator gas dapat diklasifikasikan menjadi :

1. Gas sederhana, contohnya :
  - a. Udara
  - b. Nitrogen
  - c. Helium
  - d. Hidrogen ,  
dan lain-lain
2. Gas Oksida, contohnya :
  - a. Gas karbondioksida
  - b. Gas Sulphur dioksida
3. Gas Hidrokarbon, contohnya :
  - a. Methana
  - b. Ethana
  - c. Propana  
dan lain-lain
4. Gas Elektronegatif, contohnya :
  - a. Gas Sulphur hexaflorida
  - b. CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>

Dalam pemilihan jenis isolator gas yang dipergunakan, perlu diperhatikan sifat dari kedielektrikan gas yang digunakan pada temperatur dan tekanan dimana gas tersebut akan digunakan sebagai media isolasi.

Beberapa sifat dari isolator gas sebagai media isolasi yang perlu diperhatikan antara lain yaitu :

1. Sifat Kelistrikan, yang mencakup antara lain :
  - a. Tahanan isolasi
  - b. Kekuatan Dielektrik
  - c. Faktor Daya
  - d. Konstanta Dielektrik
  - e. Rugi-rugi dielektrik
2. Temperatur,
3. Sifat Kimia, dan
4. Sifat Mekanis
  - a. kerapatan volume
  - b. viskositas
  - c. absorpsi kelembaman
  - d. tekanan permukaan,dll

Mekanisme Kegagalan Isolasi Gas Dalam mekanisme tembus listrik bahan isolasi,ada beberapa peristiwa/proses yang berperan di dalamnya, antara lain :

- a. Ionisasi, yaitu peristiwa terlepasnya elektron dari ikatan atom netral sehingga menghasilkan satu elektron bebas dan ion positif
- b. Deionisasi, yaitu peristiwa dimana satu ion positif menangkap elektron bebas sehingga ion positif tersebut menjasi atom netral
- c. Emisi, yaitu peristiwa terlepasnya elektron dari permukaan logam menjasi elektron bebas Proses dasar dalam kegagalan isolasi gas adalah ionisasi benturan oleh elektron.

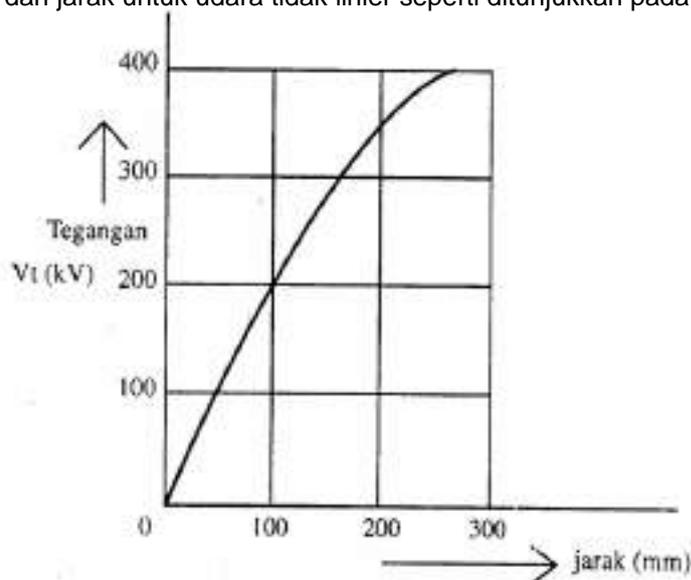
Ada dua jenis proses dasar yaitu :

- a. Proses primer, yang memungkinkan terjadinya banjir elektron
- b. Proses sekunder, yang memungkinkan terjadinya peningkatan banjir elektron

#### 4.6.1.1 Udara

Susunan udara dimuka bumi ini, terdiri atas 80 % Nitrogen ( $N_2$ ) dan kira – kira 20 % oksigen ( $O_2$ ), sedangkan yang lain yakni sekitar 1 % terdiri dari : Argon, Helium, Neon, Krypton, Carbon dioksida, dan lain – lain.

Udara merupakan bahan isolasi yang mudah didapatkan, mempunyai tegangan tembus yang cukup besar yaitu 30 kV/ cm. Contoh yang mudah dijumpai antara lain : pada JTR, JTM, dan JTT antara hantara yang satu dengan yang lain dipisahkan dengan udara. Hubungan antara tegangan tembus dan jarak untuk udara tidak linier seperti ditunjukkan pada Gambar berikut



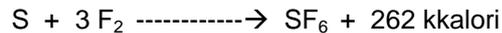
Gambar 4.4 .  $V_t = f$  (celah udara) pada  $p = 1 \text{ atm}$ ,  $F = 50 \text{ Hz}$

Pada sistem jaringan tenaga Listrik, maka udara merupakan bahan penyekat antara kawat konduktor atau antara kawat konduktor dengan tanah.

Pada tekanan udara yang tidak terlalu tinggi, udara merupakan bahan penyekat yang baik, kebocoran melalui udara adalah kecil sekali. Tetapi bila tekanan udara antara dua penghantar cukup tinggi, maka akan terjadi loncatan elektron diudara. Tegangan dimana loncatan elektron mulai terjadi dinamakan tegangan tembus (breakdown voltage). Selain itu pada keadaan lain udara sering juga digunakan sebagai pendingin.

#### 4.6.1.2. Sulphur Hexa Fluorida ( SF<sub>6</sub> )

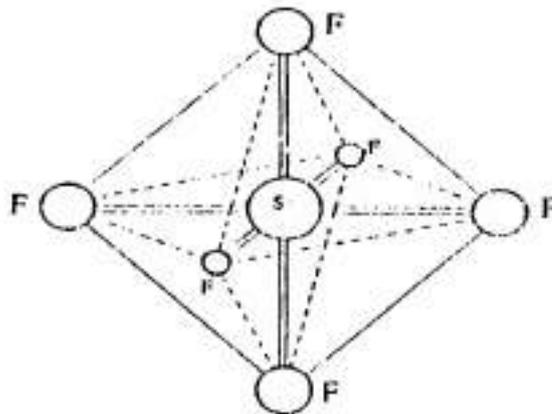
Sulfur heksafluorida (SF<sub>6</sub>) merupakan suatu gas hasil reaksi eksotermis antara unsur sulfur dengan fluor :



Sifat-sifatnya :

- Merupakan gas terberat (massa jenisnya 6,14 kg/m<sup>3</sup> atau sekitar 5 kali berat udara pada temperatur 0° C dan tekanan 1 atm )
- Tidak mudah terbakar
- Tidak larut dalam air
- Tidak beracun
- Tidak berwarna dan tidak berbau
- Tegangan tembusnya sangat tinggi yaitu 75 kV/cm
- Tepat sekali digunakan sebagai pendingin pada peralatan listrik yang menimbulkan panas atau bunga api.

Molekul SF<sub>6</sub> seperti ditunjukkan pada Gambar



Gambar. 4.5. Molekul sulphur hexa fluorida.

Terlihat pada gambar bahwa molekul SF<sub>6</sub> mempunyai 6 atom Fluor yang mengelilingi sebuah atom Sulphur, di sini masing-masing atom Fluor mengikat 1buah elektron terluar atom Sulphur. Dengan demikian maka SF<sub>6</sub> menjadi gas yang inert atau stabil seperti halnya gas mulia. SF<sub>6</sub> juga merupakan bahan isolasi yang baik yaitu 2,5 kali kemampuan isolasi udara. Perbandingan SF<sub>6</sub> dengan beberapa gas lain seperti tercantum pada tabel 4.1 :

Tabel 4.1. Sifat beberapa Gas

Gas	Masa jenis kg/m <sup>3</sup>	Konduktivitas panas w/m	Tegangan tembus kv/cm
Udara	1,228	5 x 10 <sup>-6</sup>	30
	6,139	1,9 x 10 <sup>-5</sup>	75
Nitrogen	1,191	5,4 x 10 <sup>-5</sup>	30
Karbondioksida	1,867	3,2 x 10 <sup>-6</sup>	27
Hidrogen	0,086	3,3 x 10 <sup>-5</sup>	18

Seperti telah disebutkan di atas, bahwa untuk pembentukan SF<sub>6</sub> timbul panas, ini berarti bahwa pada pemisahan SF<sub>6</sub> menjadi Sulphur dan Fluor memerlukan panas dari sekelilingnya sebesar 262 k . kalori/ molekul. Hal ini tepat sekali digunakan untuk bahan pendinginan pada peralatan listrik yang menimbulkan panas atau bunga api pada waktu bekerja, misalnya : sakelar

pemutus beban. Sifat dari SF6 sebagai media pemadam busur api dan relevansinya pada sakelar pemutus beban adalah :

- a. Hanya memerlukan energi yang rendah untuk mengoperasikan mekanismenya. Pada prinsipnya SF6 sebagai pemadam busur api adalah tanpa memerlukan energi untuk mengkompresikannya, namun semata-mata karena pengaruh panas busur api yang terjadi.
- b. Tekanan SF6 sebagai pemadam busur api maupun sebagai pengisolasi dapat dengan mudah dideteksi.
- c. Penguraian pada waktu memadamkan busur api maupun pembentukannya kembali setelah pemadaman adalah menyeluruh (tidak ada sisa unsure pembentukannya)
- d. Relatif mudah terionisasi sehingga plasmanya pada CB konduktivitasnya tetap rendah dibandingkan pada keadaan dingin. Hal ini mengurangi kemungkinan busur api stabil dengan demikian ada pemotongan arus dan menimbulkan tegangan antar kontak.
- e. Karakteristik gas SF6 adalah elektro negatif sehingga penguraiannya menjadikan dielektriknya naik secara bertahap.
- f. Transien frekuensi yang tinggi akan naik selama operasi pemutusan dan dengan adanya hal ini busur api akan dipadamkan pada saat nilai arusnya rendah.

#### 4.6.1.3. Keunggulan dan Kelemahan Gas SF6 Sebagai medium Isolasi pada GIS

Keunggulan-keunggulan dari gas SF6 sebagai medium isolasi dibandingkan dengan gas-gas lainnya adalah:

1. Pengurangan sejumlah pemutus dalam hubungan seri per fasa pada rating tegangan yang digunakan.
2. Karena waktu durasi yang pendek dari busur api, maka bunga api kontak yang terjadi dibatasi meskipun untuk arus hubung singkat yang sangat tinggi.
3. Hasil busur api yang kebanyakan terdiri dari serbuk dengan sifat isolasi yang baik dapat dipindahkan saat perbaikan.
4. Gas *blast* tidak di-*discharge* (pelepasan muatan) ke atmosfer sehingga saat bekerja akan lebih tenang jika dibandingkan dengan *Air Blast Breaker*.
5. Memiliki sifat kimia yang lamban, stabil, tidak mudah terbakar dan tidak beracun.
6. Pemutus dari gas SF6 mempunyai dimensi yang lebih jika dibandingkan dengan *Air Blast Breaker*.

Sedangkan kelemahan-kelemahan dari gas SF6 adalah:

1. Relatif lebih mahal dari segi pembiayaan.
2. Walaupun dalam jumlah yang kecil, apabila terjadi kerusakan maka membutuhkan waktu yang lama untuk perbaikan
3. Gas SF6 harus dipompa ke dalam tabung penyimpanan apabila ada penelitian dan maintenance.
4. Karena titik lelehnya sangat rendah yaitu 100 Celcius dan tekanan 1,520 kN/m<sup>2</sup>, maka perlu dipakai alat pengukur suhu untuk pengontrolan.

#### 4.6.1.4.. Nitrogen

Sifat – sifatnya :

- Tidak berwarna dan tidak berbau.
- Tidak dapat terbakar dan tidak memelihara / memperbesar pembakaran.
- Sangat sedikit larut dalam air dan sukar bersenyawa dengan unsure – unsure lain.

Penggunaan :

Pengontrol saluran /kabel untuk mengetahui baik tidaknya penyekat kabel yang dipakai.

#### 4.6.1.5. Hidrogen

Sifat – sifatnya :

- Tidak berwarna dan tidak berbau.
- Merupakan gas yang teringan.
- Mudah terbakar, tetapi tidak memelihara kebakaran.
- Nyala hydrogen tidak berwarna dan menimbulkan banyak panas.
- Udara dan Hidrogen kalau bercampur mudah meletus.

Cara pembuatannya :

- Dengan elektrolisa air.
- Dengan mendinginkan gas air (CO + H<sub>2</sub>) sampai -191 °C, gas CO mengembun dan yang tinggal hanya gas H saja.

Hidrogen digunakan dalam tabung – tabung baja dengan tekanan 150 Atmosfer.

Penggunaan Gas Hidrogen :

- Sebagai pendingin turbo generator dan kondensator sinkron, penyekat panas dan listrik.

Gas Hidrogen ekonomis bila dipergunakan pada mesin – mesin dengan kapasitas 25 MW keatas. Keuntungan penggunaan gas hydrogen dibandingkan dengan udara pada sistem pendingin turbo Generator dan Kondensator sinkron adalah :

- Kerugian ventilasi berkurang antara 8 sampai 10 kali, dan efisiensi dapat naik antara 0,7 sampai 1 5 lebih tinggi dengan kepekatan Hidrogen 8 sampai 10 kali lebih rendah dari udara.
- Rata – rata pemindahan panas oleh Hidrogen pada bagian – bagian yang panas 3,5 lebih banyak dan daya hantar panas Hidrogen 6,7 kali lebih besar, sehingga dapat mengurangi 20 % keaktifan bahan (baja dan Tembaga).
- Daya tahan penyekat meningkat dengan tidak adanya oksidasi debu dan lembab sangat berkurang, sehingga mengurangi periode pemeliharaan dan perbaikan.
- Karena tidak adanya bahan kebakaran, jika terjadi kerusakan pada penyekat aliran, maka tidak dibuthkan pengaman kebakaran (hydrogen tidak memelihara kebakaran)
- Kebisingan suara berkurang sekali (kepekatan gas Hidrogen lebih pendek).
- Pendinginan yang dibutuhkan relatif lebih rendah.

Kerugian penggunaan Hidrogen :

Karena Hidrogen mudah meledak, jika bercampur dengan udara, maka hal ini menimbulkan kerugian. Dan hal ini dapat diatasi dengan penyekatan yang sebaik – baiknya terhadap bahaya kebocoran.

#### 4.6.1.6. Gas Carbon Dioksida (CO<sub>2</sub>)

Sifat – sifatnya :

- Tidak berwarna, menyebabkan rasa segar pada air.
- Tidak dapat terbakar, bahkan mematikan nyala api dan larut dalam air.

Penggunaan :

Apabila suatu mesin dimana sebelumnya menggunakan pendinginan Hidrogen, kemudian akan diganti dengan pendinginan udara atau sebaliknya, maka sebagai bahan perantara agar tidak terjadi ledakan, dipompakan gas Carbon Dioksida melalui instalasi khusus.

#### 4.7. Bahan penyekat berbentuk cair.

Pada umumnya isolator cair (minyak) sebagian besar berasal dari minyak bumi atau minyak mentah yang diolah secara khusus, sehingga mempunyai sifat-sifat sebagai isolator dan juga sebagai pendingin. Isolator minyak bumi mudah didapat dan murah dibanding dengan minyak lain (*non* minyak bumi).

Sifat fisika terpenting dari minyak pelumas yang perlu diketahui adalah viskositasnya. Viskositas dapat dinyatakan sebagai tahanan aliran fluida yang merupakan gesekan antara molekul-molekul cairan satu dengan lainnya.

Suatu cairan yang dapat mengalir dengan mudah misalnya fluida air dikatakan mempunyai viskositas kecil, dan sebaliknya pada bahan-bahan yang sulit mengalir seperti aspal mempunyai viskositas yang besar.

Isolator minyak sintesis seperti *hidrokarbon sintesis, ester, hidrokarbon aromatik khlorinat* proses pembuatannya melalui reaksi kimia yang sangat mahal dan rumit juga tidak mudah di dapat unsur kimianya, kelebihan isolator minyak sintesis adalah isolator jenis ini sederhana dalam pengoperasian peralatan.

Minyak transformator adalah minyak mineral yang diperoleh dengan pemurnian minyak mentah. Dalam pemakaiannya, minyak ini karena pengaruh panas dari rugi-rugi di dalam transformator akan timbul hidrokarbon. Selain berasal dari minyak mineral, minyak transformator dapat pula yang dapat dibuat dari bahan organik, misalnya : minyak trafo Piranol, Silikon. Sebagai bahan isolasi, minyak transformator harus mempunyai tegangan tembus yang tinggi.

#### 4.8 Cara-cara Mendapatkan Bahan Isolasi

Untuk mendapatkan bahan-bahan isolasi minyak yang berasal dari minyak bumi dilakukan penyulingan. Hasil dari proses penyulingan tersebut dipilih suatu tipe khusus dari minyak bumi untuk menghasilkan suatu daerah hasil. Daerah hasil yang disebut fraksi tersebut dijadikan sebagai fraksi tunggal dalam proses selanjutnya, yang di lakukan dengan 4 cara :

##### 4.8.1 Penyulingan Asam (*acid refinery*)

Pada proses ini, senyawa-senyawa *organik* dari *hidrokarbon* tak jenuh yang terdapat dalam minyak akan bereaksi dengan asam sulfat sehingga terdapat suatu endapan berupa lumpur (*sludge*) yang kemudian dapat di pisahkan setelah pengendapan dan pengeluaran lumpur

tersebut, kemudian dibersihkan dengan soda koustik dan air (penetralkan dan pencucian) untuk menghilangkan sisa-sisa asam.

**4.8.2 Ektrasi Pelarut (soluen ekstraksion)**

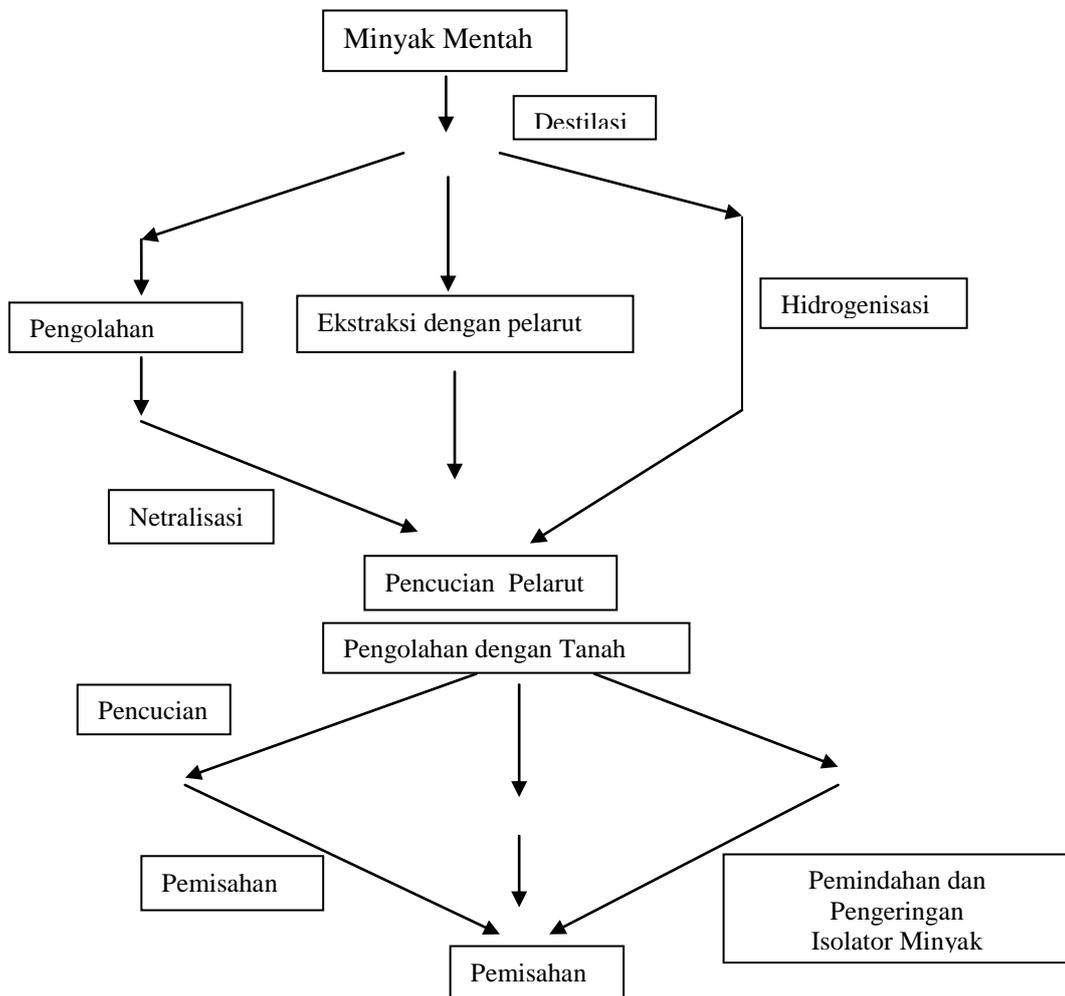
Proses ini bertujuan untuk memperbaiki indeks viskositas, warna serta setabilitas minyak terhadap oksidasi. Dalam proses ini komponen-komponen aromatis yang mempunyai indeks viskositas rendah dipisahkan dengan ekstraksi pelarut. Pelarut yang digunakan biasanya adalah *fultural* dan kadang-kadang *fenol*.

**4.8.3 Hidrogenisasi**

Proses ini dilakukan dengan cara mereaksikan *hidrogen* dengan menggunakan katalisator oksidasi logam seperti almunium pada suhu dan tekanan tinggi. Dalam proses ini terjadi penurunan kadar belerang, *nitrogen*, dan terjadi juga penjenuhan senyawa-senyawa aromatis yang ada.

**4.8.4 Proses Kombinasi**

Ketiga metode di atas masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan. Untuk itu umumnya pabrik-pabrik penyulingan modern menggunakan cara kombinasi yaitu penggabungan antara cara ekstrasi pelarut dan hidrogenisasi. Berikut merupakan bagan proses atau langkah-langkah pembuatan isolasi minyak:



Gambar 4.6. Proses atau langkah pembuatan isolasi cair (minyak)

**4.9 Sifat-sifat Isolator Minyak**

Isolator adalah alat listrik yang dipakai untuk menjalankan tugasnya mengisolasi di dalam rangkaian listrik. Alat ini mempunyai sifat dan kemampuan untuk dapat memisahkan secara elektris dua buah penghantar atau lebih yang berdekatan sehingga tidak terjadi kebocoran arus atau dalam *gradien* yang tinggi tidak terjadi loncatan api (*flashover*) dengan demikian bahan isolasi harus mempunyai kekuatan *dielektrik* yang baik sehingga sifat hantarnya dapat ditiadakan.

Media *dielektrik* yang paling baik adalah ruangan vakum yang sifat hantarnya nol, karena bahan isolasi minyak bukanlah *dielektrik* yang sempurna, dengan kata lain molekul-molekul yang terdapat pada bahan tersebut tidak terikat erat tetapi masih terdapat elektron-elektron yang dapat bergerak bebas atau dapat terlepas dari ikatan akibat dari menerima beban tegangan dan menimbulkan aliran arus bocor (*leakage current*) atau arus yang mengalir melalui media elektrik.

Banyak sifat-sifat minyak yang penting dalam penggunaannya sebagai cairan isolasi. Sifat-sifat tersebut dibagi dalam tiga kelompok yaitu sifat fisika, sifat kimia, dan sifat elektrik. Sifat-sifat fisika secara umum karakteristik panas dan aliran suatu cairan sangat penting dalam proses perencanaan peralatan. Sementara sifat-sifat kimia penting selama pengoperasian peralatan dan sifat-sifat listrik untuk memonitor kondisi minyak baik sebelum dan selama pengoperasian. Sifat elektrik lebih mengarah pada ketahanan bahan dalam menahan besar tegangan pada sistem baik saat gangguan maupun normal.

#### 4.9.1 Sifat-sifat Fisika Isolator Minyak

Sifat-sifat fisika yang penting dari isolator minyak adalah sebagai berikut :

##### 1. Kejernihan.

Minyak isolasi tidak boleh mengandung suspensi (endapan)

##### 2. Konduktifitas panas (*thermal conductivity*)

Adalah kemampuan isolator minyak menghantarkan panas. Sifat ini dapat menentukan kecepatan panas yang di hilangkan dari peralatan sehingga volume minyak dan tipe pendingin yang dibutuhkan dapat di rencanakan.

##### 3. Masa jenis (*specific mass*)

Adalah perbandingan masa suatu volume pada 15,56 °C dengan masa air pada volume dan suhu yang sama. Masa jenis isolator minyak dari minyak mineral lebih kecil di banding air, oleh karena itu adanya air dalam minyak akan mudah terpisah.

##### 4. Kerapatan (*density*)

Penggunaan umum dari kerapatan adalah untuk mengubah berat cairan (kg) ke dalam volume (m<sup>3</sup>). Dengan kata lain kerapatan mempunyai satuan kg/m<sup>3</sup>. besar satuan transaksi dagang yang normal, tetapi lebih penting pada hubungan teknik yang dihubungkan dengan banyak karakteristik fisik suatu cairan.

##### 5. Kekentalan (*viscosity*)

Kekentalan merupakan tahanan dari cairan untuk mengalir kontinyu dan merata tanpa adanya turbulensi (putaran) dan gaya-gaya lain. Viskositas isolator minyak biasanya diukur pada waktu alir minyak dengan volume tertentu pada kondisi yang diatur. Viskositas suatu cairan berubah bersama suhu dan kecepatan perubahan, tergantung pada keadaan fisik. Dalam fungsinya sebagai media pendingin, maka viskositas minyak merupakan faktor penting dalam aliran konveksi untuk memindahkan panas. Viskositas dapat juga dipakai sebagai dasar pembagian kelas minyak.

##### 6. Titik Nyala (*flash point*)

Temperatur ini adalah temperatur campuran antara uap dari minyak dan udara yang akan meledak (terbakar) bila didekati dengan bunga api kecil. Untuk mencegah kemungkinan timbulnya kebakaran dari peralatan dipilih minyak dengan titik nyala yang tinggi. Titik nyala dari minyak yang baru tidak boleh lebih kecil dari 135 °C, sedangkan suhu minyak bekas tidak boleh kurang dari 130 °C. Untuk mengetahui titik nyala minyak dapat diketahui dengan menggunakan alat *Close up tester*.

##### 7. Titik Tuang (*Pour point*).

Titik tuang suatu minyak adalah suhu dimana minyak baru saja mengalir ketika didinginkan di bawah kecepatan perubahan suhu. Titik tuang dipakai untuk mengidentifikasi dan menentukan jenis peralatan yang akan menggunakan isolator minyak.

##### 8. Titik Api (*fire point*)

Titik api atau titik bakar dari isolator minyak adalah dimana suhu minyak sudah di dalam keadaan terbakar. Titik api ini dapat menunjukkan minyak itu mengandung zat yang mudah terbakar.

##### 9. Kekuatan Pelarut (*Solven power*)

Kekuatan pelarut atau solvensi dari suatu cairan isolasi sangat penting berhubungan dengan pengaruhnya pada bahan-bahan dari konstruksi peralatan. Material yang seluruhnya atau sebagian tersebut adalah cairan isolasi akan mempengaruhi sifat-sifat kelistrikannya.

##### 10. Tekanan Uap (*Vapour pressure*)

Tekanan uap dari suatu cairan isolasi minyak mineral jarang disebutkan dalam hubungannya dengan peralatan listrik. Pengutan *hidrokarbon* ke dalam rongga (*void*) tekanan rendah dapat diharapkan mempunyai suatu pengaruh pada pemutusan permulaan dan pertumbuhan suatu

minyak yang menyerap gas dari suatu uap tekanan tinggi mungkin diharapkan mempunyai pengaruh yang lebih menguntungkan dari pada suatu uap tekanan rendah atau gas yang menyusun minyak. Distribusi dari *hidrogen* yang menyerap gas adalah penting. Penekanan yang lebih lanjut dalam tekanan uap diputuskan oleh kriteria lain seperti titik nyala api, titik api dan konsentrasi dari uap minyak di *atmosfer*.

#### 11. Flamibilitas (*Flamability*)

Pada umumnya suatu minyak mineral yang berasal dari minyak bumi mempunyai sifat yang mudah terbakar (*Flammable*) dan pembakarannya merupakan suatu reaksi *ekothermis* yang tinggi dan mendorong perambatan. Jadi diharapkan isolator minyak ini tidak bersifat terbakar (*non flammable*).

#### 12. Tekanan Pada Permukaan (*Interfacial tension*)

Tekanan pada permukaan antara dua cairan diketahui sebagai tekanan *interfacial* dan untuk sistem minyak- air adalah gaya yang penting untuk melepaskan rantai dasar horisontal dari platinum ke atas, dari permukaan air pada *interface* yang menggunakan suatu tipe kaseimbangan *Du noity*, satuannya adalah  $Nm^{-1}$

#### 13. Kontaminasi Partikel (*Particle contaminations*)

Kontaminasi atau pencemaran partikel dapat mempengaruhi sifat-sifat listrik cair.

### 4.9.2 Sifat-sifat Kimia Isolator Cair (Minyak)

Sifat-sifat yang penting dari isolator minyak adalah sebagai berikut:

#### 1. Angka Kenetralan (*Newtralization Number*)

Angka kenetralan dinyatakan dalam mg KOH yang di bulatkan pada titrasi suatu garam minyak. Angka kenetralan merupakan angka yang menunjukkan penyusun asam dan dapat mendeteksi kontaminasi minyak, kecenderungan perubahan kimia atau cacat atau indikasi perubahan kimia bahan tambahan (*additive*). Selain itu angka kenetralan merupakan petunjuk umum untuk menentukan apakah minyak yang sedang dipakai harus diganti atau diolah.

#### 2. Kemantapan Oksidasi (*Oxidation stability*)

Oksidasi adalah suatu proses antara suatu unsur atau molekul dengan oksigen. Oksidasi muncul dalam semua subjek peralatan terhadap atmosfer di udara. Hal utama dalam oksidasi ini adalah asam, kotoran zat padat dan air. Sifat kestabilan terhadap oksidasi perlu untuk mengevaluasi kecenderungan minyak membentuk asam, air dan kotoran zat padat. Asam-asam, kotoran zat padat dan air yang membentuk akibat oksidasi akan menurunkan tegangan tembus. Selain itu air dan asam-asam dapat menyebabkan korosi terhadap logam dan dapat mempercepat degradasi isolasi padat, sedangkan kotoran zat padat akan menyebabkan terganggunya proses perpindahan panas (*Heat Transfer*) dan menghasilkan kecepatan oksidasi serta suhu tinggi. Faktor penting yang mempengaruhi oksidasi isolator minyak adalah oksidasi, suhu dan bahkan yang bertindak katalis oksidasi.

#### 3. Kandungan Air (*Water Content*)

Air yang ada dalam minyak merupakan hasil proses oksidasi adanya air dalam isolator minyak dapat menurunkan tegangan tembus dan tahanan jenis isolator minyak dan juga adanya air akan mempercepat kerusakan kertas pengisolasi (*insulating paper*). Pencemaran minyak oleh air adalah alami muncul, dan kandungan air yang ada dalam minyak sangat berpengaruh pada sifat-sifat listrik minyak dan penyerapan ke dalam isolasi padat

#### 4. Kandungan Gas (*gas content*)

Adanya gas terlarut dan gas bebas dalam isolator minyak dapat digunakan untuk mengetahui kondisi transformator dalam operasi, kandungan gas isolator minyak (minyak transformator) adalah *volume* gas yang terkandung dalam 100 bagian *volume* minyak transformator dan dinyatakan dalam persen pada 760 mmHg dan 0 °C. Gas-gas tersebut diantaranya *hidrogen* ( $H_2$ ), *metan* ( $CH_4$ ), *etana* ( $C_2H_6$ ), *etilen* ( $C_2H_4$ ) dan *asitilen* ( $C_2H_2$ ) yang terjadi pada saat dibawah tegangan listrik dan kondisi ionisasi, dan adanya gas-gas tersebut dapat menunjukan terjadinya dikomposisi isolator minyak pada kondisi operasi. Sedangkan gas-gas lain seperti karbon *dioksida* ( $CO_2$ ) dan karbon *monoksida* ( $CO$ ) terjadi pada saat suhu yang terjadi pada kondisi pirolisis (pemutusan panas dan *disruptive*). Kandungan kedua gas tersebut dapat menunjukan adanya kerusakan pada bahan isolasi.

#### 5. Kondisi Belerang (*Corrosive Sulphur*)

Minyak transformator dalam pemakaiannya secara terus menerus kontak dengan bahan-bahan logam seperti tembaga, besi dapat menyebabkan korosi. Uji korosi belerang ini perlu untuk melihat kemungkinan adanya korosi minyak sebagai akibat adanya belerang bebas atau senyawa belerang lainnya dalam minyak.

## 6. Angka Proksida

Angka *proksida* ini dipakai untuk menentukan jumlah penyusun pengoksidasian (*oxidation constituent*) suatu minyak. Minyak yang mengalami kerusakan akan menghasilkan *proksida* dalam bentuk senyawa lain. Penentuan angka *proksida* juga menentukan ukuran tentang adanya kerusakan minyak.

### 4.9.3 Sifat-sifat Listrik Isolator Minyak

Sifat-sifat listrik yang penting pada isolator minyak yang berperan dalam menyakinkan unjuk kerja peralatan yang memuaskan diantaranya :

#### 1. Tegangan Tembus/Gagal (*Elektrical Strength/Breakdown Voltage*)

Tegangan tembus adalah tegangan dimana kegagalan tegangan (*breakdown voltage*) terjadi antara dua *elektroda* pada kondisi uji tertentu. Tegangan tembus minyak transformator perlu diukur karena merupakan ukuran kesanggupan minyak transformator untuk menahan *elektrikal stress* tanpa kerusakan. Selain itu, tegangan tembus rendah dapat menunjukkan adanya zat kotoran (kontaminan) seperti air, debu atau penghantar dalam minyak.

#### 2. Kekuatan Implus (*Impulse Strength*)

Sifat ini digunakan untuk mengetahui sejauh mana kekuatan isolator minyak menahan tegangan *impuls* yang terjadi dalam sesaat akibat faktor luar maupun faktor dalam.

#### 3. Resistivitas (*Resistivity*)

Adalah nilai tahanan yang dimiliki oleh suatu bahan isolasi atau muatan dari kekuatan daerah listrik searah (*direct current*) dan kepadatan (*density*) arus pada keadaan tetap (*steady state*) dalam bahan. Resistivitas erat hubungannya dengan partikel zat yang bersifat penghantar. Resistivitas yang rendah menunjukan minyak mengandung kontaminasi yang bersifat konduktif seperti air, asam-asam dan partikel bermuatan lainnya. Pengukuran resistivitas dipandang penting untuk memonitor minyak, sebagaimana telah diperlihatkan menjadi perbandingan yang masuk akal dari oksidasi asam dan dipengaruhi oleh pencemaran yang tidak diinginkan seperti garam-garam, logam dan air. Campuran lain dalam minyak yang dapat mempengaruhi resistivitas adalah *aldehid*, *keton* dan alkohol.

#### 4. Faktor Kebocoran Dielektrik (*Dielectric Dissipation Factor*)

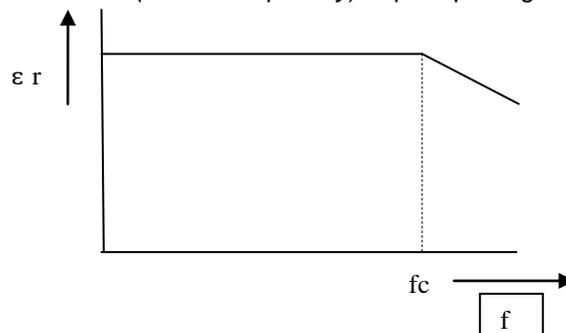
Daya yang hilang dalam operasi transformator disebabkan kehilangan energi sebagai panas akibat pecahan-pecahan molekul-molekul. Harga kebocoran *dielektrik* yang tinggi menunjukan adanya kontaminan atau hasil kerusakan minyak seperti air, hasil oksidasi berupa kotoran, logam, alkali, koloid bermuatan. Faktor kebocoran *dielektrik* suatu minyak pada kekuatan frekuensi secara umum analog terhadap resistivitas dan dipengaruhi faktor – faktor minyak yang sama (pencemar) dan kondisi uji.

#### 5. Permittivitas (*Permittivity*)

Permittivitas bahan *dielektrik* atau disebut tetapan bahan *dielektrik* (*dielectric constant*) adalah sifat yang dimiliki oleh setiap bahan *dielektrik* yaitu ukuran untuk menentukan besarnya energi elektrostatik tersimpan persatuan *volume* untuk setiap gradien potensial. Besarnya nilai tetapan *dielektrik* ditetapkan dengan cara membandingkan terhadap tetapan *dielektrik* media vakum. Nilai tetapan *dielektrik* suatu bahan besarnya tidaklah tetap, tetapi dipengaruhi oleh beberapa perubahan yang mempengaruhi bahan *dielektrik* saat bahan menerima beban tegangan, yaitu :

##### a. Frekuensi tegangan yang ditahan

Kenaikan frekuensi pada bahan *dielektrik* tidak dengan sendirinya langsung menurunkan nilai ketetapan *dielektrik* bahan. Tetapi besarnya ketetapan akan tetap pada frekuensi tertentu. Nilai kenaikan frekuensi yang menyebabkan *dielektrik* mengalami penurunan disebut frekuensi kritis  $f_c$  (*critical frequency*) seperti pada gambar dibawah ini :



Gambar 4.7 Pengaruh frekuensi terhadap tetapan *dielektrik*

Frekuensi kritis diberikan oleh persamaan dibawah ini :

$$F_c = \frac{kT}{8\pi\eta R^2} \dots\dots\dots (4.6.)$$

Dengan :

- F<sub>c</sub> = frekuensi kritis
- T = suhu mutlak
- R = jari-jari molekul
- k = tetapan *boltzman*

Fenomena ketergantungan tetapan *dielektrik* atas frekuensi disebut dispersi permitifitas yang analog dengan dispersi cahaya.

- b. Ketergantungan terhadap suhu  
Perubahan suhu-suhu tidak mempengaruhi polaritas *dielektrik*, tetapi kenaikan suhu ada bahan akan menghasilkan jumlah molekul yang dapat terpolarisasi berkurang. Berkurangnya molekul yang terpolarisasi akan menurunkan tetapan *dielektrik* bahan. Ini dapat diperhatikan secara nyata bila suhu isolator minyak dinaikan. Akan terbentuk gas yang mempunyai nilai tetapan *dielektrik* tidak sama dengan semula.
- c. Ketergantungan terhadap tegangan  
Dalam *dielektrik* tertentu, permitivitas bertambah dengan bertambahnya tekanan. Untuk *dielektrik* cair dapat dijumpai kenaikan tekanan diikuti kenaikan permitifitas dan semakin tinggi tekanan terjadi penurunan permitivitas.
- d. Ketergantungan terhadap campuran  
Adanya campuran pada bahan dapat dipandang atas dua komponen, yaitu dapat tersusun seri atau paralel.
- e. Ketergantungan terhadap kelembaban  
Perubahan kelembaban menimbulkan pengaruh terhadap udara dan permukaan isolator. Semakin besar kandungan air, nilai tetapan *dielektrik* bertambah.

**4.9.4 Syarat-syarat Isolator Minyak Yang Baik**

Dari uraian sifat-sifat isolator minyak untuk memenuhi tujuannya sebagai isolator (pengisolasi), isolator minyak harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

1. Jernih, tidak mengandung endapan;
2. panas jenis dan daya hantar tinggi;
3. Viskositas rendah;
4. Kerapatan rendah;
5. Titik nyala tinggi;
6. Titik api tinggi;
7. Masa jenis rendah;
8. Kandungan zat gambar yang rendah;
9. Tidak mudah terbakar;
10. Kestabilan kimia dan sifat penyerapan gas yang baik;
11. Bebas asam, kotoran dan air;
12. Tegangan tembus tinggi;
13. Faktor kehilangan dielektrik rendah;
14. Kekuatan *implus* dan resistivitas tinggi;
15. Permitivitas, tinggi rendahnya tergantung pemakaian;
16. Murah dan mudah didapat (faktor ekonomi).

Suatu isolasi minyak yang baik harus memenuhi beberapa syarat sebagaimana dikeluarkan oleh standar pengujian bahan internasional. ASTM merupakan standar yang sering digunakan sebagai batasan syarat dari minyak isolasi. Adapaun beberapa syarat serta nilai yang dianjurkan dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

Tabel 4.2. Standart setara nilai dari *karakteristik* minyak yang baik

Karakteristik	Standar ASTM	Nilai
Kekuatan <i>dielektrik</i>	D-1816	≥ 28 Kv (1,02 mm)
Spesific Grafity	D1298	825 – 890 kg/m <sup>3</sup>
Viskosity	D445	3 – 16 cSt (40 <sup>0</sup> C)
Pour Point	D97-66	- 30 <sup>0</sup> C
Water Content	D1533	35 – 15 ppm

Flash point	D92-78	145 <sup>0</sup> C
Fire Piont	D92-78	> 150 <sup>0</sup> C
Impulse Strength	D3300	145 kV
Resistivity	D1169	3 – 10 GΩm

#### 4.9.5 Aplikasi Penggunaan

Dalam penggunaannya, isolator minyak dijumpai dalam peralatan-peralatan listrik, seperti transformator, *switchgear*, *bushing*, kabel dan kapasitor. Sifat-sifat cairan yang penting yang harus diperhatikan terhadap tipe-tipe peralatan yang menggunakannya dapat dilihat pada tabel berikut ini

Tabel 4.3. Contoh peralatan yang menggunakan minyak isolator

Peralatan	Kepentingan Sifat Cairan
Transformator	Stabilitas kimia, karakteristik suhu, tahanan api
Switcheger	Pembentukan karbon, pemadam
Bushing	Kelistrikan
Kabel	Kelistrikan, karakteristik gas, permitifitas, stabilitas suhu
Kapasitor	Kelistrikan, karakteristik gas, permitifitas, stabilitas suhu

#### Transformator

Desain masing-masing tipe transformator tergantung pada fungsinya, tetapi dalam semua kasus kriteria utama yang mempengaruhi isolasi cairan adalah panas yang dihasilkan selama mentransformasikan tegangan, rugi-rugi tahanan belitan, rugi histeristis, rugi-rugi arus eddi dan kebocoran *fluks* magnetik. Rugi-rugi tersebut berlangsung dari 5% dari *power* input. Suhu yang meningkat dapat mempercepat proses oksidasi minyak *hidrokarbon* dimana proses tersebut menghasilkan uap air yang larut dan ini secara normal membatasi masa penggunaan cairan tersebut. Lebih jauh lagi pengaruh-pengaruh yang keras di hasilkan oleh kondisi-kondisi gagal transformator yang memberikan tekanan-tekanan listrik yang tinggi dan pencemaran suhu panas yang tinggi. Rating tegangan dan fungsi dari peralatan mempunyai pengaruh yang umum pada sifat-sifat cairan yang khusus.

Cairan yang mengisi transformator melayani dua fungsi penting, yaitu sebagai isolator dan pendingin. Suhu adalah salah satu faktor terpenting dalam degradasi cairan dan suatu kenaikan suhu 7 °C dapat meningkatkan kira-kira 2 kali kecepatan degradasi. Suhu dalam transformator dibatasi dengan kriteria desain dan standar yang digunakan, diantaranya untuk suhu-suhu maksimum dan kenaikan suhu. Pada transformator kecil yang mempunyai permukaan tangki yang besar mengandalkan pendingin secara konveksi normal. Pada transformator besar disesuaikan dengan metode pendingin dan transformator mempekerjakan berbagai metode peralatan pendingin buatan, misalnya dengan menggunakan kipas, radiator, pompa sirkulasi, dan air luar.

Transformator transmisi yang mengandung *volume* cairan terbesar hingga mencapai kira-kira 130.000 liter. Transformator tersebut bekerja pada tegangan yang tinggi dan dilengkapi dengan konservator dan kesatuan pendingin. Ini dapat menurunkan kecepatan degradasi cairan dan padatan isolasi berurutan sehingga memastikan masa pakai peralatan lebih lama.

Transformator distribusi mengandung 20 sampai 10000 liter cairan dan beroperasi dibawah 70 kV. Konservator dan peralatan pendingin disesuaikan dengan peralatan tegangan yang lebih tinggi, yang diharapkan memberikan suatu masa pakai yang lebih ekonomis. Proses oksidasi adalah faktor yang menentukan dalam masa pakai cairan *hidrokarbon* dari peralatan tipe ini, karena rasio tipe cairan dan udara yang terkandung lebih kecil dan juga karena pengoprasian suhu umumnya lebih tinggi.

Transformator elektronik dan peralatan kecil lainnya mengandung *volume* cairan yang sangat kecil, tetapi secara normal didesain sebagai unit yang disegel.

#### 1. *Switchger*

Alat-alat yang menahan arus cairan yang diisikan dan dihubungkan dengan peralatan yang dihubungkan sebagai *switchger* dan beroperasi pada tegangan-tegangan seluruh sistem. Pengisian minyak pada *switcger* mempunyai fungsi untuk memutuskan jalan yang dibentuk antara kontak-kontak yang bergerak dan untuk meminimalkan aliran arus ketika percikan bunga api muncul.

Selama pengoprasian normal, yaitu saat saklar membuka atau menutup, tekanan listrik dan suhu cairan rendah. Selama hubungan buka dan tutup, suatu bunga api yang dihasilkan terdiri dari partikel-partikel ionisasi terkonduksi dari tahanan listrik, tekanan listrik dan suhu tinggi

sebagai hasil dari pembusukan dari cairan isolasi muncul dan diubah menjadi karbon, berat hidrokarbon dan hidrogen rendah.

Volume cairan dalam suatu saklar (*switch*) bervariasi dari sekitar 45 liter (dalam minyak rendah / *low oil*) sampai 5000 liter (dalam minyak terbesar / *bulk oil*).

## 2. Bushing

Cairan yang mengisi suatu *bushing* mempunyai fungsi untuk mencegah penetrasi kelembaman dari resin yang terkandung dalam isolator. *Bushing* yang menggunakan minyak menggunakan suatu pengisian cairan bersama dengan klep-klep inti isolasi diantara konduktor dan selubung porselin luar.

## 3. Kabel

Cairan digunakan sebagai kandungan kabel tipe padat atau sebagai inti untuk lubang inti, cairan didinginkan dan tekanan gas dinaikan. Cairan mempunyai fungsi utama sebagai *dielektrik* dan bertekanan tinggi (hingga kira-kira 15 kV per mm) cairan juga berfungsi sebagai pendingin ketika disirkulasi melalui pipa-pipa dalam kabel. Dalam seluruh tipe kabel berselubung, cairan dibawah tekanan tangki hingga 15 bar untuk mencegah pembentukan pori-pori dan hasil ionisasi selama perubahan suhu. Cairan yang digunakan untuk pengisian kabel harus mempunyai sifat kekentalan tinggi, permifitas rendah, faktor kehilangan *dielektrik* rendah dan penyerapan gas yang baik.

## 4. Kapasitor

Pemilihan cairan isolasi untuk sebuah kapasitor tergantung dari fungsi dan penerapan kapasitor, sama pentingnya dengan perencanaan dan operasinya. Dimensi fisik sebuah kapasitor perlu dijaga tetap minimum karena ruangan instalasi terbatas. Cairan untuk kapasitor mempunyai permivitas yang tinggi, karena cocok dengan desainnya. Kebanyakan kapasitor dikonstruksi sebagai peralatan yang dibungkus.

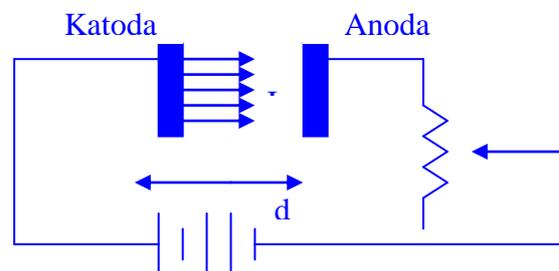
### 4.10 Tegangan Gagal Isolator Minyak

Isolasi berfungsi untuk memisahkan bagian-bagian yang mempunyai beda tegangan agar supaya diantara bagian-bagian tersebut tidak terjadi lompatan listrik (*flash-over*) atau percikan (*spark-over*). Kegagalan isolasi pada peralatan tegangan tinggi yang terjadi pada saat peralatan sedang beroperasi bisa menyebabkan kerusakan alat sehingga kontinuitas sistem menjadi terganggu. Dari beberapa kasus yang terjadi menunjukkan bahwa kegagalan isolasi ini berkaitan dengan adanya *partial discharge*. *Partial discharge* ini dapat terjadi pada material isolasi padat, material isolasi cair dan juga material isolasi gas.

Pada umumnya terjadinya tegangan gagal pada suatu isolator, baik pada jenis isolator padat, cair, gas maupun vakum tidaklah sama. Pada masing-masing isolator tersebut memiliki faktor berbeda yang berpengaruh terhadap kuat *dielektriknya*. Pada bahan isolator minyak, pengetahuan tentang fenomena tegangan tembus tidak seluas yang diketahui pada isolator padat dan gas. Fenomena tegangan tembus pada isolasi minyak dimulai dari teori *Townsend* tentang *ionisasi*, mekanisme pembentukan *streamer*, yang menyebabkan tegangan tembus, juga mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi tegangan tembus isolasi minyak.

#### 4.10.1 Kriteria Tegangan Tembus Menurut Townsend

Kriteria tegangan tembus menurut *Townsend* ini dijelaskan untuk proses yang terjadi pada bahan isolasi gas. Perhatikan gambar dibawah ini :



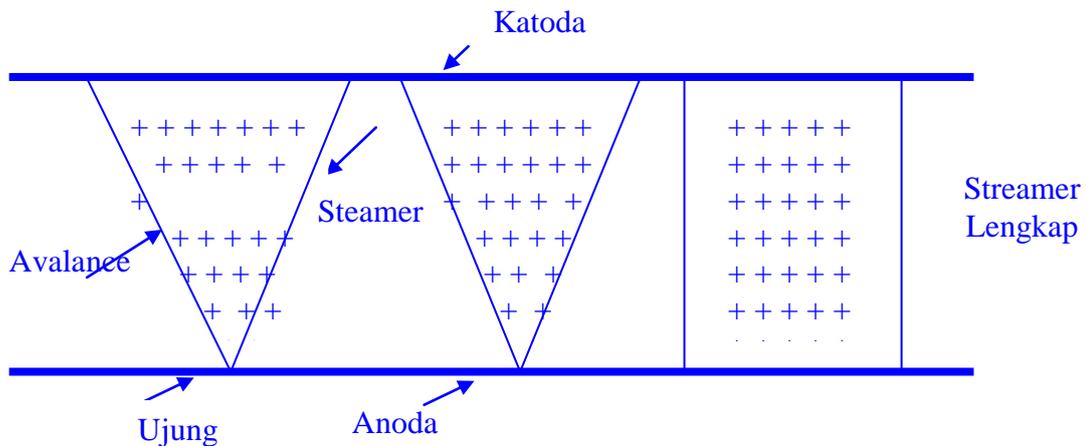
Gambar 4.8 Arus Pertumbuhan *Townsend*

Dua buah *elektroda* terpisah sejauh *d* dan berada di dalam gas pada tekanan *p*. Medan listrik seragam diberikan diantara dua *elektroda*. Dianggap bahwa sejumlah *N<sub>0</sub>* *elektroda* terbentuk di katoda karena radiasi *ultraviolet*. Hal ini menyebabkan kenaikan arus sebesar *I<sub>0</sub>* ampere, pada *X = 0*.

Ketika suatu elektron bertumbukan dengan sebuah partikel netral, terbentuk partikel ion positif (+) dan negatif (-). Ini dikarenakan ionisasi.

#### 4.10.2 Mekanisme Pembentukan Streamer

Mekanisme pembentukan streamer pada bahan isolasi minyak melahirkan banyak kesamaan terhadap proses-proses klasikal dalam gas. Elektron yang meninggalkan katoda dan tambahan-tambahan elektron yang ada dalam cairan mendapatkan energi dalam medan listrik dan berpindah ke anoda. Elektron-elektron bertumbukan dengan molekul-molekul cairan dan jika gradien tegangan cukup tinggi disosiasi cairan dapat terjadi untuk membentuk kantong-kantong gas berukuran mikron. Dalam daerah kerapatan yang lebih rendah proses-proses tipe *townsend* mungkin muncul dan menyebabkan suatu multiplikasi dari pembawa muatan karena elektron sekitar  $10^5$  kali gerakannya dalam cairan dibandingkan dengan ion. Penumpukan ion positif dapat muncul. Jika suatu rangkaian daerah-daerah yang sangat kecil berkerapatan rendah dalam suatu gap paralel datar, suatu ikatan mereka dapat disuplai dengan elektron-elektron dari suatu daerah emisi yang lebih disuplai pada katoda. Pada pelucutan ini menjadi dibangun sepanjang suatu *track* yang sedikit bergerigi yang mengikuti daerah-daerah inti berkerapatan rendah dan dari katoda. Proses kegagalan tegangan tiba-tiba berubah menjadi suatu model baru perkembangan yang menyerupai proses streamer dalam suatu gas. Proses streamer ini mungkin muncul ketika suatu kerapatan muatan cukup tinggi, mungkin ion-ion positif, dibangun pada ujung dari pelepasan primer yang muncul dalam suatu gas. Beberapa streamer berkembang membebentuk serbuan (*afalanche*) yang baru dan terjadi penambahan daerah *afalanche* yang bergerak dalam bentuk kanal mencapai anoda, akhirnya celah diantara kedua elektroda dipenuhi oleh plasma yang konduktif. Dengan suatu titik negatif, proses kegagalan adalah sama kecuali bahwa hanya *track* pelucutan yang sangat pendek perlu diciptakan sejak titik hampir dapat untuk melalui streamer mengembangkan dirinya sendiri. Dengan titik positif, serbuan elektron bergerak menuju titik yang mulai membentuk *channel* gas yang berdekatan pada permukaan *elektroda* yang mana multiplikasi serbuan dapat muncul. Muatan positif yang beraksi seperti suatu perluasan titik dan menyebabkan streamer positif berkembang menuju kekatoda.



Gambar 4.9. Pembentukan streamer

Proses pembentukan streamer yang berlanjut ini akhirnya akan membentuk suatu jalur yang konduktif antara dua elektroda tersebut terjadilah kegagalan isolator dalam penahanan tegangan.

#### 4.10.3 Tegangan Tembus (*Breakdown Voltage*)

Yang dimaksud tegangan tembus atau tegangan gagal atau *breakdown voltage* adalah tegangan dimana isolator minyak tidak mampu menahan tegangan. Perlu di catat bahwa besarnya tegangan gagal pada bahan isolasi antara satu bahan dengan bahan lainnya tidaklah sama, tetapi bergantung pada kuat *dielektrik* masing-masing bahan. Bahan isolasi dapat dibedakan atas bahan isolasi padat, cair dan gas, masing-masing memiliki faktor-faktor yang berbeda yang berpengaruh pada kuat *dielektrik*-nya.

Pengetahuan tentang mekanisme terjadinya kegagalan tegangan dalam bahan isolasi minyak belumlah seluas yang seperti yang diketahui pada bahan isolasi padat dan gas. Walau demikian dari pengalaman telah dibuktikan bahwa kehadiran unsur lain dalam bahan akan menurunkan kuat *dielektrik* berarti menurunkan tingkat kemampuan bahan untuk menahan tegangan.

Kegagalan bahan *dielektrik* cair ketika diberi beban tegangan dapat ditimbulkan oleh dua sebab yaitu kegagalan elektronik (*electronic breakdown*) dan kegagalan lubang (*cavity breakdown*). Kegagalan elektronik merupakan proses gerakan elektron diinjeksikan ke dalam cairan, gerakan ini menambah energi medan listrik dan mempercepat proses ionisasi molekul, ionisasi ini akan menghasilkan aliran arus.

Kegagalan akibat lubang (*cavity breakdown*) disebabkan pada cairan terdapat gelembung udara (*gas*). Terbentuknya proses gelembung bahan cair dapat terjadi dengan terbentuknya kantung-kantung gas pada permukaan *elektroda* permukaan suhu dan tekanan, pemisahan (*dissociation*) yang dihasilkan oleh tumbukan elektron menambah jumlah terbentuknya gelembung udara, penguraian cairan akibat muatan yang ditimbulkan oleh adanya *corona* dari permukaan yang tidak merata pada elektron.

#### 4.10.4 Pengaruh Gelembung-gelembung (*Bubble Gas*) pada Tegangan Tembus

Pada gelembung dapat terbentuk kantung gas yang terdapat dalam lubang atau retakan permukaan *elektroda*, yang dengan penguraian molekul-molekul cairan menghasilkan gas atau dengan penguatan cairan lokal melalui emisi elektron melalui ujung tajam katoda. Gaya elektrostatik sepanjang gelembung segera terbentuk dan ketika kekuatan kegagalan gas lebih rendah dari cairan, medan yang ada dalam gelembung melebihi kekuatan uap yang menghasilkan lebih banyak uap dan gelembung sehingga membentuk jembatan pada seluruh celah yang menyebabkan pelepasan secara sempurna.

Pengaruh gelembung pada kegagalan tegangan (*breakdown voltage*) bervariasi menurut keadaan. Dalam cairan *deassed* ditunjukkan pada medan listrik pada daerah-daerah 50 kV/mm pada suhu *ambient* atau di bawah produksi elektron tiruan dan multiplikasi dekat katoda menyebabkan suatu gelembung untuk berkembang secara langsung sebagai suatu hasil input energi listrik yang meningkatkan suhu menjadi mungkin 50<sup>0</sup> C. Dalam hal ini gelembung-gelembung dapat dikatakan sebagai *manifestasi* sekunder dari suatu *discharge* yang sedang berkembang dengan multiplikasi elektron sebagai penyebab utama. Selain itu cairan yang terkontaminasi dengan gas dan air dan khususnya bila di panaskan secara berputar akan dengan mudah membentuk gelembung-gelembung dari proses secara fisika dan kimia yang dipengaruhi oleh tegangan yang diberikan. Dalam kasus ini gelembung-gelembung berukuran sekitar *submikron* (berukuran seperti partikel) yang dinyatakan sebagai penyebab dasar dari pertumbuhan *discharge*, paling tidak pada daerah yang seragam.

Kehadiran gelembung gas dalam cairan menghasilkan medan listrik yang besarnya :

$$E_b = \frac{3E_0}{\epsilon_1 + 2} \dots\dots\dots (4.7)$$

Dengan,  $E_0$  = Medan dalam cairan dengan kehadiran gelembung  
 $\epsilon_1$  = Permittivitas cairan

Bila  $E_b$  bernilai sama dengan medan ionisasi gas, pelepasan muatan akan berlangsung diikuti dengan kegagalan. Untuk keadaan praktis pemakaian sehari-hari, kegagalan bahan isolasi lebih dititik beratkan dengan adanya unsur-unsur lain yang melekat pada bahan. Unsur-unsur ini dapat berupa hasil kontaminasi atau akibat ketidak murnian yang terjadi selama proses pembuatan.

#### 4.10.5 Pengaruh Kecepatan Aliran Partikel dan Cairan Terhadap Tegangan Tembus

Dalam cairan yang tercemar, proses-proses *breakdown* didorong oleh suatu fenomena yang bervariasi yang dihubungkan dengan pencemaran. Suatu serat basah dalam suatu cairan bertekanan listrik mungkin menyempotkan suatu aliran air atau uap sepanjang suatu *channel breakdown*. Pencemaran yang hebat oleh serat mungkin menyebabkan pada suatu jembatan dari serat yang terbentang antara dua *elektroda*. Ini akan menyebabkan *breakdown* pada tegangan lebih rendah dari pada bila tanpa serat partikel tunggal yang besar mungkin melompat berulang-ulang dari suatu *elektroda* ke *elektroda* yang lain dalam suatu gap tertekan yang dibutuhkan partikel ketika dekat dengan suatu *elektroda* menyebabkan tertolak menuju *elektroda* dimana *elektroda* itu memberikan muatannya dan akhirnya menolaknya kembali.

Dengan menggunakan kamera yang mengambil 10000 gambar/detik, partikel dalam daerah berukuran 100 mikrometer dapat diamati untuk menyalang suatu gap 1 mm dalam 1 hingga 100 mikrodetik. Pada ujung dari struktur *elektroda* dimana medan sulit menerima, partikel akan berubah mengikuti jalur berbentuk kurva dari garis-garis *fluks* dan mungkin secara bertahap tersempotkan dari daerah medan tinggi. Ketika suatu partikel besar berada pada elektron, *discharge* darinya mungkin mencetuskan *breakdown* yang lengkap dari gap tersebut. Jika minyak

dipompa melalui suatu gap diantara *elektroda* atau *elektroda* diputaran, pemutusan dari rantai-rantai serat, gerakan dari penumpukan gas-gas dan kemungkinan gangguan pada proses-proses elektron kimia pada *elektroda* akan mempengaruhi tegangan gagal DC dan AC yang diberikan daripada tegangan gagal *impuls*. Pengaruh partikel pada kondisi *breakdown* tidak dapat dipisahkan dari pergerakan cairan itu di bawah suatu medan listrik yang ditetapkan. Partikel-partikel yang diserbu, serat-serat atau kelompok ion-ion akan berpindah dalam arah medan yang tepat dengan membawa cairan bersama mereka. Suatu proses yang dikenal sebagai *elektroconvection* dan *electrohydrodynamic* (EHD). Cairan akan bersirkulasi dalam suatu medan listrik selama ada suatu variasi dalam kerapatan muatan. Kecepatan arus *steady state* dari suatu partikel tunggal dengan radius *R* dalam suatu medan listrik *E* adalah :

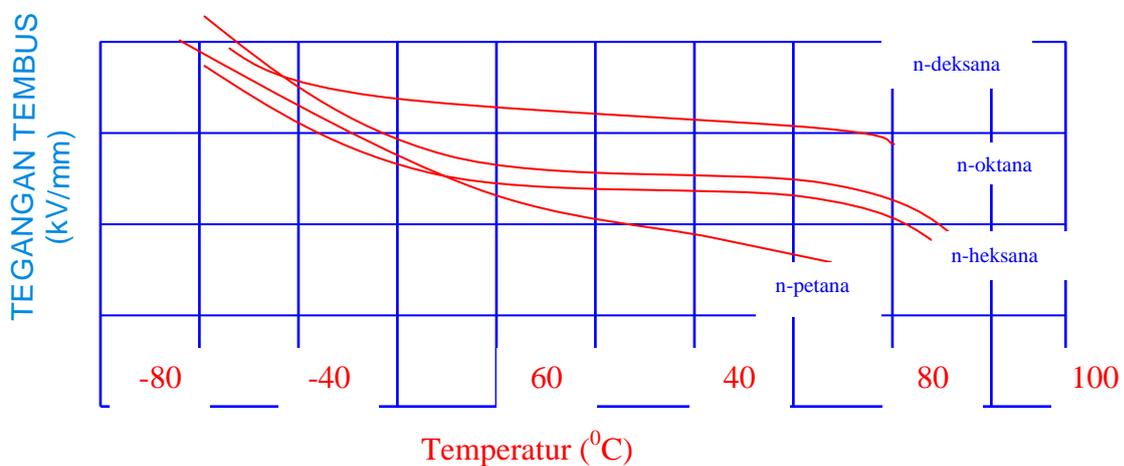
$$\bar{V} = \varepsilon_1 E_2 \frac{R}{2\mu} \dots\dots\dots (4.8)$$

Dengan,  $\varepsilon_1$  = Permittivitas cairan  
 $\mu$  = Viskositas cairan  
 R = Jari-jari partikel

**4.10.6 Pengaruh Suhu**

Bagian dari keseimbangan dinamis dari kandungan gas dan air dari isolator minyak, harus memperhatikan beberapa parameter yang berkaitan dengan suhu, diantaranya viskositas, tekanan permukaan dan densitas. Viskositas dan densitas mempengaruhi kecepatan aliran insulasi melalui saluran-saluran atau melewati bagian-bagian tegangan tinggi khususnya untuk isolasi yang didinginkan secara alami, seperti dalam transformator distribusi. Kecepatan aliran cairan benar-benar mempengaruhi kekuatan listrik karena dapat mempercepat perkembangan *discharge* dan *streamer*. Bila viskositas turun, *elektrokonveksi* atau proses EHD dapat mempermudah terjadinya *breakdown*. Dengan meningkatnya suhu, tekanan permukaan pada cairan akan turun dan akan mempengaruhi pembentukan gelembung-gelembung.

Variasi karakteristik suhu dengan *breakdown voltage* dari suatu cairan isolasi, diberikan Lewis seperti gambar di bawah. Lebih dari kisaran suhu operasi bisa untuk cairan isolasi, seperti minyak mineral, tegangan gagal mungkin sedikit naik antara 20° C hingga 50 °C, kemudian turun, biasanya dengan suatu penurunan yang tetap di atas 100° C. ini tergantung pada karakteristik semua beban yang digunakan dalam struktur isolasi dan tergantung pada kandungan gas dan air.

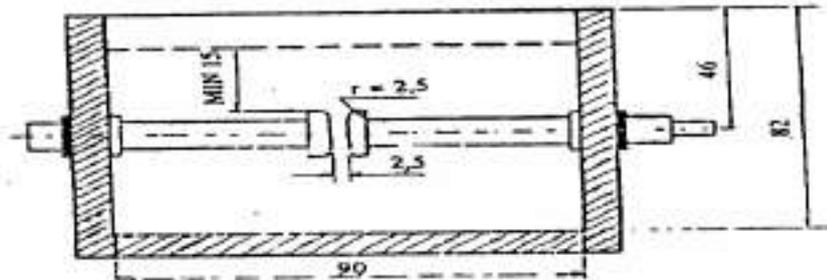


Gambar 4.10 pengaruh suhu terhadap tegangan *breakdown* minyak

**4.10.7 Pengaruh Kelembaban (kandungan air)**

Kandungan air yang terdapat pada cairan isolasi yang berasal dari proses oksidasi, dimana suhu yang tinggi (meningkat) dapat mempercepat proses oksidasi, hal ini sangatlah berpengaruh pada besarnya tegangan tembus suatu cairan isolasi. Seperti diketahui bahwa air mempunyai sifat mudah menghantarkan arus listrik, maka semakin banyak kandungan air dalam cairan isolasi, maka semakin rendah tegangan yang akan ditahan isolasi tersebut. Hal ini dibenarkan oleh *Binns*, 1983, dengan melakukan pengujian menggunakan *elektroda* berbentuk bola berdiameter 12,5 mm pada suhu 25 °C, jarak *elektroda* 3,5 mm.

Pengujian tegangan tembus minyak transformator dapat dilakukan dengan menggunakan peralatan seperti ditunjukkan pada Gambar.



Gambar 4.11 Alat pengujian tegangan tembus minyak transformator

Jarak elektroda dibuat 2,5 cm, sedangkan tegangannya dapat diatur dengan menggunakan auto-transformator sehingga dapat diketahui tegangan sebelum saat terjadinya kegagalan isolasi yaitu terjadinya locatan bunga api. Locatan bunga api dapat dilihat lewat lubang yang diberi kaca. Selain itu dapat dilihat dari Voltmeter tegangan tertinggi sebelum terjadinya kegagalan isolasi (karena setelah terjadinya kegagalan isolasi voltmeter akan menunjukkan harga nol. Tegangan temus nominal minyak transformator untuk tegangan kerja tertentu dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4. Tegangan Tembus standart Minyak Transformator

Tegangan kerja peralatan	Tegangan tembus (kV) untuk jarak 2,5 (cm)	
	Minyak baru	Sedang dipakai
Diatas 35 kV	40	35
6 s/d 35 kV	30	25
Di bawah 6 kV	30	20

Dengan demikian dapat diketahui apakah minyak transformator ketahanan listriknnya memenuhi persyaratan yang berlaku. Ketahanan listrik minyak transformator dapat menurun karena pengaruh asam dan dapat pula karena kandungan air.

Yang paling penting dan banyak dipakai sebagai penyekat adalah :

- Minyak transformator dan minyak penghubung.
- Minyak kabel

#### 4.10.8 Minyak transformator

Fungsi minyak transformator :

- Mengeluarkan panas yang ditimbulkan arus listrik dalam kumparan.
- Suatu bahan isolasi yang baik.
- Melindungi kumparan transformator dari air.

Syarat – syarat minyak transformator :

- Tidak boleh mengandung kadar air, mengingat meskipun kadar airnya rendah, dapat menimbulkan akibat – akibat yang berbahaya.

Pemeriksaan minyak transformator :

- Minyak dipanaskan dalam suatu tabung kimia sampai 130 °C.
- Pada keadaan temperature tersebut, minyak transformator ; tidak boleh mendidih atau berbuih, tidak boleh terdapat air (embun) pada dinding kaca diatas minyak.
- Sebelum minyak transformator dimasukkan kedalam kotak/tanki transformatornya, maka minyak tersebut haruslah dikeringkan terlebih dahulu (dipanaskan), sehingga semua bagian – bagian air didalamnya menguap.
- Pemanasan minyak dilakukan dengan elemen pemanas listrik yang ditempatkan dalam minyak.

#### 4.10.9 Minyak penghubung.

Pada kebanyakan penghubung, terutama penghubung tegangan tinggi, selain menggunakan penyekat gas (air blast) atau hampa, maka juga digunakan minyak. Sehingga pemutusan arus listriknnya terjadi dalam minyak (OCB : oil circuit breaker).

Syarat – syarat minyak penghubung :

- Tidak boleh mengandung bagian – bagian yang menjadi arang pada pemanasan, sebab bagian – bagian arang tersebut dapat melekat pada kontaknya dan pada waktu diputuskan terjadi peledakan.
- Titik didihnya 150 °C.

#### 4.10.10 Minyak Kabel

Minyak kabel merupakan hasil permunian minyak bumi. Agar supaya pekat, minyak kabel dicampur dammar.

Fungsi minyak kabel :

- Menguatkan daya sekat kertas.
- Menguatkan daya mekanis kertas.
- Menjaga supaya air tidak menguap.
- Sebagai bahan dielektrik.

Penggunaan :

Minyak kabel digunakan untuk memadatkan penyekat kertas pada kabel tenaga, kabel tanah dan terutama kabel tegangan tinggi.

#### 4.11 Bahan penyekat berbentuk padat

Isolator dari bahan padat paling banyak dipakai diandingkan dengan isolator bahan cair dan gas. Jenis dan sifatnya sangat banyak sehingga agar mudah dalam pemahamannya, dikelompokkan menurut jenis bahannya dan menurut suhu maksimum yang diijinkan. Pengkodean dan pengelompokkan isolator menurut jenis bahannya ditunjukkan pada Tabel 4.5, sedangkan pengelompokkan menurut suhu maksimum yang diijinkan ditunjukkan pada Tabel 4.6.

**Tabel 4.5 Pengelompokkan isolator menurut jenis bahannya**

Kode	Bahan
A	Hasil tambang antara lain : batu pualam, asbes, mika, mikanit, mikafolium, mikalek
B	Berserat antara lain : benang, kain, kertas, prespan, kayu
C	Gelas dan keramik
D	Plastik
E	Karet, bakelit, ebonit
F	Bahan yang dipadatkan (serbuk)

**Tabel 4.6. Pengelompokkan isolator bahan padat dan batas suhunya pada mesin listrik**

Kelas	Suhu maksimum yang diijinkan (°C)	Keterangan
A	95	Kertas dan cellulose yang belum diolah
AH	115	Seperti kelas A, tetapi telah dioalh misalnya dengan vernis dan lilin.
B	115	Asbes dan mika yang belum diolah
H	125	Asbes, mika dan silika yang sudah diolah
C	Tak terhingga	Bahan anorganik dan organik dengan pengikat seperti gelas, porselin dan keramik

Seperti telah dijelaskan bahwa bahan isolator juga sering disebut sebagai bahan dielektrik, yaitu bahan penyekat listrik yang sulit atau tidak dapat dialiri arus listrik bila diberi tegangan. Jadi isolator yang baik adalah yang mempunyai kuat dielektrik atau konstanta dielektrik  $k_d$  yang besar. Besarnya kuat dielektrik suatu isolator dapat dicari dari permitivitas bahannya yaitu  $k_d = e/e_o$ , dimana  $e$  permitivitas bahan dan  $e_o$  permitivitas hampa. Pada tabel 4.7 ditunjukkan kuat dielektrik  $k_d$  dan tegangan dadal  $V_d$  dari berbagai macam isolator.

**Tabel 4.7 Kuat dielektrik  $k_d$  dan tegangan dadal  $V_d$  Berbagai macam isolator bahan padat**

No.	Bahan isolator	Kuat dielektrik $k_d$	Tegangan dadal $V_d$ (kV/cm)
1.	Vakum	1,0	
2.	Udara	1,0006	
3.	Karet	2,94	
4.	Teflon	2	
5.	Plexiglass	3,4	

6.	Vinil	3,18	
7.	Pholytelin	2,25	
8.	Minyak trafo		
9.	Mika	3-6	
10.	Gelas kuarsa	3,8	600
11.	Kaca	3,8-6,9	2500
12.	Air distilasi	80	
13.	MgO (polikristal)	9,3	100
14.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,5	100-300
15.	TiO <sub>2</sub>	96	20-120
16.	BaTiO <sub>3</sub>	1200-1500	120

Keterangan :

1.  $K_v$  pada suhu kamar
2. Tegangan dadal sering juga disebut dengan tegangan tembus adalah tegangan yang menyebabkan isolator gagal berfungsi sebagai penyekat.

#### 4.11.1. Bahan tambang.

Bahan tambang merupakan bahan yang asalnya didapat dari penggalian tanah. Bahan ini ada yang berbentuk biji (besi, timah, seng dan lain – lain), harus diproses terlebih dahulu dalam dapur untuk mendapatkan bahan yang dikehendaki. Selain itu ada berbentuk brongkolan/batu (pualam, batu tulis dan sebagainya)

##### 4.11.1.1 Batu Pualam

Yang dimaksud dengan batu pualam adalah batu kapur (CaCO<sub>2</sub>) atau Dolomit yang dapat dipoles.

Sifat – sifatnya :

- Ada yang berwarna putih, kuning, kelabu dan lain - lain tergantung dari warna pigmen.
- Mudah pecah dan berat.
- Mudah menghisap air dan minyak

Karena sifat – sifat seperti tersebut diatas, maka sekarang batu pualam jarang dipakai sebagai bahan penyekat.

##### 4.11.1.2 Asbes

Asbes merupakan bahan yang berserat, tidak kuat dan mudah putus. Selain itu asbes tidak dapat terbakar jadi tahan panas yang tinggi.

Asbes dapat dibuat lempeng – lempeng tipis, yang disebut kertas asbes. Sedangkan semen asbes dibuat dari bahan semen Portland sebagai pengikat dan asbes sebagai pengisi, kemudian dipress dalam keadaan dingin dan dibuat dalam bentuk papan, lempeng, tabung dan lain – lain. Asbes disamping digunakan sebagai penyekat panas, juga sebagai penyekat listrik. Sebagai penyekat listrik, asbes dipergunakan pada tegangan rendah. Untuk mempertinggi daya rekat listriknya, asbes dicelup dalam pernis, sirlak atau bahan penyekat lainnya, sehingga daya mekanis dan daya tahan air lebih kuat.

##### 4.11.1.3 Mika

Sifat – sifat dari mika :

- Kekuatan dielektriknya 3000 V/mm.
- Dielektrik loss factornya rendah.
- Tahanan listriknya rendah.
- Tahan terhadap panas dan lembab.
- Temperatur kerjanya baik.
- Kekuatan mekanisnya baik.
- Mudah melentur tapi kuat.

Bentuk – bentuk senyawa dari mika :

- Mika alam, Muscovita [K Al<sub>2</sub> Al Si<sub>3</sub> O (OH)<sub>2</sub>] disebut juga Lenit mika, merupakan bahan yang paling banyak digunakan. Selain itu Phlogopite [K Mg, Al Si<sub>3</sub> O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>] sifatnya tidak sebaik Muscovite, tetapi lebih tahan terhadap temperature yang tinggi, mempunyai kestabilan yang tinggi dan jernih
- Mika sintesis; Flourophlogopite, mika ini dibuat dengan jalan memanaskan campuran antara Silikat, Alumunium, Magnesium, dan ditambahkan kedalamnya Florence Coumpound. Susunan atomnya hampir sama dengan Phlogopite.

Campuran – campuran mika :

Diantara campuran – campuran mika yang terpenting adalah : Glass bounded mica (Micalox), yaitu gelas yang dilapisi mika, kadang – kadang bahan ini dicampurkan Aluminium dan Reconstituted mica, merupakan bahan mika yang mempunyai susunan tertentu yang memungkinkan diambil lapisannya.

Penggunaan mika :

- Sebagai bahan isolasi yang terpenting seperti pada elemen – elemen pemanas pada mesin – mesin listrik.
- Sebagai bahan dielektrik termasuk kelas C, karena tahan terhadap temperature, bila dicampur dengan dielektrik kelas A akan membentuk golongan perantara B dan bila dicampur dengan silicon menghasilkan bahan dielektrik kelas B dipergunakan sebagai bahan pengisi kapasitor.
- Sebagai bahan kapasitor ; mika receiving, mika transmitting dan mica reconstituted.

#### **4.11.1.4 Mekanit**

Merupakan mika yang dirubah sesuai dengan kebutuhan pemakaiannya. Contohnya :

- Pelat mekanit
- Mekanit komutator, dipakai sebagai penyekat lamel – lamel komutator pada mesin arus searah dan mesin komutator.
- Pita mekanit

#### **4.12 Bahan – bahan berserat**

Ada 3 macam golongan dasar yang dipergunakan, yaitu :

- Tumbuh – tumbuhan.
- Binatang
- Bahan tiruan

Sebenarnya bahan ini kurang baik sebagai bahan penyekat, listrik karena sifatnya yang sangat menyerap cairan. Kita tahu bahwa cairan dapat merusak penyekat dan daya sekat listriknya akan turun.

Factor – factor yang menyebabkan bahan serat dipakai sebagai bahan penyekat listrik :

- Bahannya melimpah, sehingga harganya murah.
- Daya mekanisnya cukup baik (kuat dan fleksibel).
- Dengan disusun berlapis – lapis dan dengan dicampur zat – zat lain, dapat diperbaiki daya mekanisnya, daya sekatnya dan ketahanannya terhadap panas.

Contohnya :

- Benang, terbuat dari kapas atau sutera.
- Tekstile, terbuat dari benang yang ditunen dan dijadikan pita atau kain. Selain itu dikenal tekstil tiruan, misalnya nilon, teteron, decron, trilin dan sebagainya.
- Kertas terbuat dari bahan dasar Selulux.
- Prespan, sebangsa kertas, hanya sifatnya yang lebih padat sehingga kurang menyerap air
- Kayu
- Fibre yang divulkanisir.
- Pita perekat.

#### **4.13 Bahan penyekat keramik**

Bahan keramik adalah bahan dari batu – batuan yang diperoleh dengan proses pemijaran dari berbagai bahan galian.

##### **4.13.1 Porselin**

Porselin adalah bahan isolasi kelompok keramik yang sangat penting dan luas penggunaannya. Istilah bahan-bahan keramik adalah digunakan untuk semua bahan anorganik yang dibakar dengan pembakaran pada suhu tinggi dan bahan asal berubah substansinya.

Bahan dasar dari porselin adalah tanah liat. Ini berarti bahan dasar tersebut mudah dibentuk pada waktu basah, tetapi menjadi tahan terhadap air dan kekuatan mekaniknya naik setelah dibakar. Penggunaan isolator dari porselin antara lain : isolator tarik, isolator penyangga, rol isolator seperti dapat dilihat pada Gb. 4 12

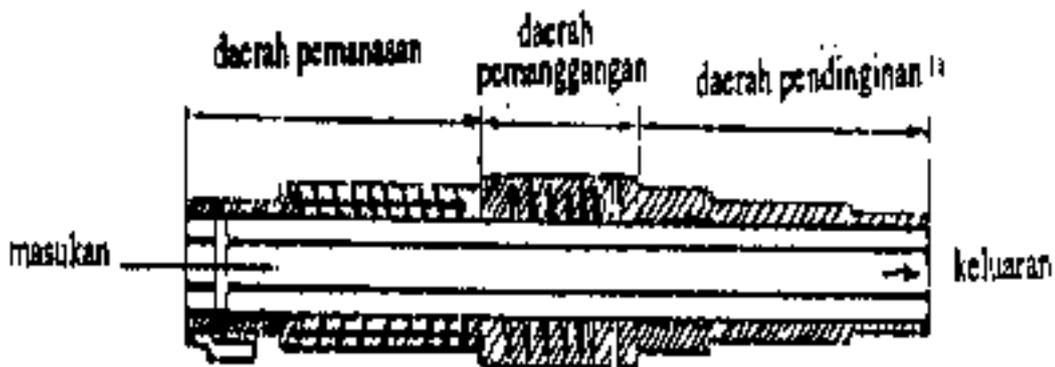


Gambar 4.12 isolator porselin

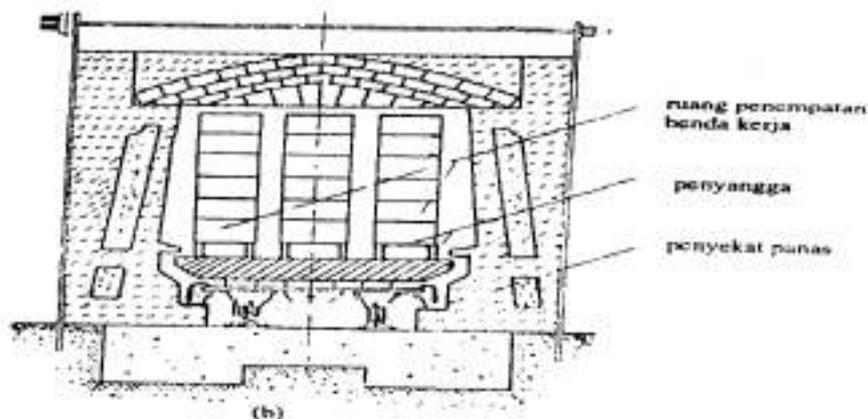
Tanah liat khusus misalnya tanah liat Cina dan tanah liat yang sudah diolah digunakan pada pabrikasi porselin setelah dicampur dengan kuarsa. Proses pembuatan perangkat dari porselin secara garis besar adalah sebagai berikut :

Setelah tanah liat dibersihkan dari kotoran-kotoran misalnya : kerikil, kemudian dicampur dengan air sehingga homogen (tetapi tidak terlalu encer seperti bubur). Selanjutnya adalah tahap pembentukan yaitu dengan : putaran, penekanan, cetakan dan ekstrusi. Selanjutnya setelah perangkat terbentuk, dikeringkan lalu diadakan pelapisan dengan gelas (glazing) dan terakhir adalah tahap pembakaran. Perlu diingat bahwa pada proses pembuatan perangkat dari keramik sejak masa basah hingga selesai dibakar akan terjadi pengecilan dimensi. Sedangkan pada proses pelapisan dengan gelas dan pembakaran menentukan sekali kualitas produk. Pada proses pelapisan dengan gelas, kaca halus atau bahan dasar kaca atau campuran keduanya dipanaskan hingga meleleh, kemudian digunakan melapisi perangkat yang dikehendaki dengan cara mencelupkan benda atau permukaan yang diinginkan untuk dilapisi. Pelapisan dengan gelas semacam ini digunakan untuk memperkuat dan sekaligus menghiasi permukaan, akan menjadikan produk porselin makin sedikit kemampuannya menyerap air, mudah dibersihkan, menghilangkan retak-retak yang ada dipermukaan. Dengan pelapisan gelas, arus bocor yang melalui permukaan isolator akan lebih kecil terutama pada keadaan basah dan sekaligus menaikkan tegangan terjadinya loncatan busur api (flashover). Seperti pada penggunaan kaca bersama-sama dengan logam, koefisien termal antara pelapis dan yang dilapisi harus sama. Jika gelas pelapisnya mempunyai  $\alpha$  lebih kecil dari pada  $\alpha$  yang dilapisi akan terjadi keompresi pada waktu terkena suhu yang rendah. Sedangkan jika kaca pelapis mempunyai  $\alpha$  yang lebih besar daripada  $\alpha$  yang dilapisi pada waktu terkena suhu di atas suhu normal pelapisnya akan retak (bentuk retaknya kecil memanjang) yang disebut crazing. Retakan ini akan menurunkan kekuatan mekanik benda. Untuk pelapisan benda-benda porselin yang besar dapat dilakukan dengan menuangkan bahan pelapis pada permukaannya. Maksud dari pembakaran adalah untuk mendapatkan kekuatan mekanik, kemampuan isolasi dan ketahanan terhadap air yang lebih tinggi. Selama pembakaran, struktur kristal dari tanah liat (bahan dasar keramik) akan berubah, air yang dikandung akan hilang. Selama pembakaran juga akan terjadi lubang-lubang kecil. Untuk menutup lubang-lubang ini digunakan bahan yang disebut feldspar. Feldspar selama pembakaran akan meleleh sehingga mengisi lubang-lubang kecil yang terjadi tersebut, sekaligus berfungsi sebagai bahan penguat. Untuk pembuatan isolator porselin diperlukan suhu yang berkisar antara  $1300^{\circ}$  hingga  $1500^{\circ}$  C dalam jangka waktu 20 hingga 70 jam. Kenaikan suhu dari suhu normal hingga suhu di atas adalah perlahan-lahan. Setelah mencapai suhu yang diinginkan, pendinginannya dilakukan secara perlahan-lahan sebelum dikeluarkan dari oven. Untuk pembakaran atau pemanasan dalam oven dapat digunakan : solar, gas, batubara atau listrik. Cara pembakaran pada benda yang akan dibuat (sebelumnya dikeringkan) diletakkan di ruang bakar agar tidak berhubungan langsung dengan nyala api atau lilian elemen pemanas jika yang digunakan pemanas listrik. Hal ini untuk menghindari pemanasan yang tidak merata dan pembentukan jelaga. Bagian dasar dari benda tidak perlu dilapisi dengan gelas agar tidak melekat dengan dasar ruang pembakaran jika sudah dingin.

Terdapat 2 macam oven untuk pembakaran porselin yaitu jenis Pemanggang (Kiln)



Gambar 4.13 Pembakaran porselin membujur

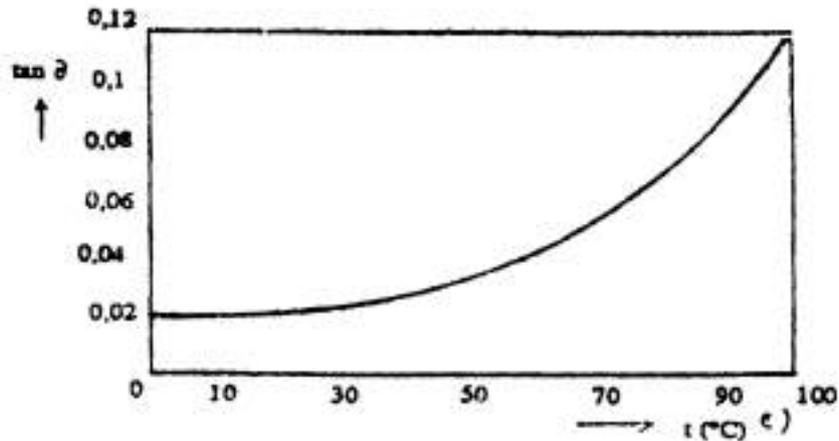


Gambar 4.14 Pembakaran porselin melintang dan jenis terowongan.

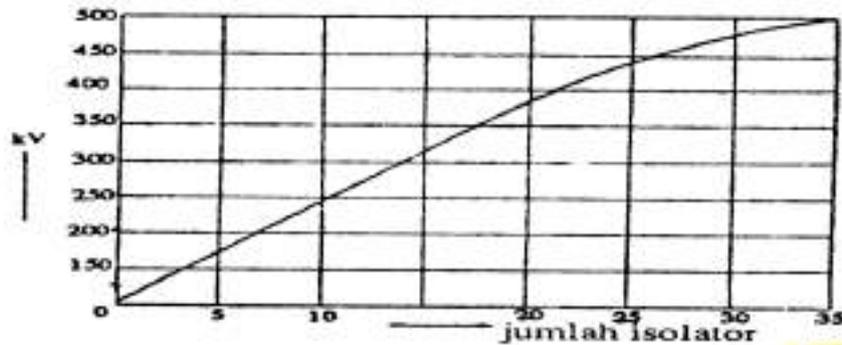
Pada oven jenis pemanggang proses pembakaran dan pendinginan dilakukan secara serentak untuk beberapa benda kerja. Untuk industri kecil, oven ini tepat digunakan. Oven jenis kedua yaitu jenis terowongan penampangnya seperti ditunjukkan pada Gb. 4.14. Dalam oven ini benda yang dipanaskan dilewatkan melalui oven secara perlahan-lahan. Panjang oven ini dapat mencapai 100 meter, terdiri dari 3 bagian proses yaitu : daerah pemanasan, daerah pemanggang dan daerah pendinginan.

Suhu tertinggi adalah didaerah tengah yaitu daerah pemanggang dan bagian pinggir lebih dingin. Dengan demikian selama perjalanan benda-benda kerja akan terjadi pemanasan dan pendinginan secara bertahap dan perlahan-lahan. Karena pada oven jenis terowongan ada bagian yang selalu bergerak (untuk menempatkan benda kerja) maka pemanasan terhadap benda kerja adalah terus menerus, demikian pula pengambilan bagi benda kerja yang selesai dipanasi tidak perlu memadamkan oven. Pengecilan yang terjadi selama proses pembuatan benda porselin dari keadaan basah hingga pembakaran adalah sebesar 20 %. Karena itu untuk pembuatan benda porselin pada waktu masih mentah harus lebih besar dari ukuran yang presisi, karena hal ini dipengaruhi komposisi bahan dan kondisi pembakarannya. Umumnya produk-produk porselin toleransi yang masih dapat ditolerir berkisar antara 2 hingga 5 %.

Benda-benda porselin disarankan tidak disambung dengan menggunakan sekrup tetapi untuk menyambung menggunakan lem, semen atau diikat dengan logam. Sifat-sifat porselin adalah sebagai berikut : masa jenis berkisar antara 2,3 hingga 2,5 g/cm<sup>3</sup>, koefisien muai panjang ( $\alpha$ )  $3 \cdot 10^{-6}$  hingga  $4,5 \cdot 10^{-6}$  per<sup>o</sup> C. Hal ini perlu mendapatkan perhatian jika dilem dengan semen atau diikat dengan logam, karena  $\alpha$  semen =  $11 \cdot 10^{-6}$  per<sup>o</sup> C,  $\alpha$  baja =  $14 \cdot 10^{-6}$  per<sup>o</sup> C. Kekuatan tekan porselin adalah 4000 hingga 6000 kg/ cm<sup>2</sup>, kekuatan tarik 300 hingga 500 kg/ cm<sup>2</sup> untuk yang menggunakan pelapis, 200 hingga 300 kg/ cm<sup>2</sup> yang tanpa pelapis. Kekuatan tekuk 80 hingga 100 kg/ cm<sup>2</sup>. Porselin lebih regas daripada kaca.



Gambar 4.15 Kurva  $\tan \delta = f(t)$  pada porselen



Gambar 4.16 Tegangan kerja = f(jumlah isolator)

Sifat kelistrikan porselin antara lain : tegangan tembus berkisar antara 10 hingga 30 kV/ mm, resistivitas  $10^{11}$  hingga  $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ , permittivitas ( $\epsilon$ ) berkisar antara 6 hingga 7,  $\tan \delta$  0,015 hingga 0,02. Sudut kerugian dielektrik akan naik jika suhu dinaikkan seperti ditunjukkan pada Gb. 4.15. Penggunaan porselin sebagai isolator adalah luas sekali baik sebagai isolator penyangga maupun sebagai isolator tarik. Untuk itu penggunaan porselin sebagai isolator harus diperhatikan kemampuan mekanismenya disamping kemampuan elektrisnya. Penggunaan isolator pada tegangan tinggi, yang juga harus menjadikan pertimbangan adalah tegangan pelepasan (discharge-voltage) nya. Tegangan pelepasan adalah tegangan yang dikenakan pada isolator yang menyebabkan mengalirnya arus listrik melalui permukaan diantara elektroda-elektroda. Dalam banyak kasus, pelepasan ini menyebabkan busur api pada permukaan isolator. Busur api ini dapat terjadi pada keadaan kering maupun basah (curah hujan 4,5 hingga 5,5 mm/ detik).

Porselin dibuat dari tanah porselin, kwartz dan veldspeat. Porselin dibuat dengan 2 metode, yaitu : proses basah dan kering.

Sifat – sifatnya :

- Daya sekat tinggi.
- Kekuatan mekanis yang besar.
- Dapat diberi beban berat yang menekan.
- Tahan terhadap perubahan – perubahan suhu.
- Porselin yang di glazuur tidak dapat menghisap air dan sebab itu baik dipakai dalam udara luar dan ruang – ruang yang besar.

Sifat kurang baik dari porselin :

- Tidak kuat terhadap kekuatan menumbuk dan memukul.

Data Porselin :

- Absorpsi : 0 – 0,03
- Berat jenis : 2,4
- Elastisitas :  $10 \times 10^6 \text{ Lb/Cm}^2$
- Tahanan : 1013 Ohm Cm
- Hantaran panas : 0,0037 Cal/det.Cm.oC
- Panas jenis : 0,22

Pemakaian :

Porselin banyak dipakai sebagai isolator listrik.

#### 4.13.2 Steatit

Steatit dalam asam sebagai pelican yang berkulit putih, sebagai kapur tulis, kalau berwarna kuning atau abu –abu sering disebut batu spek.

Sifat – sifatnya :

- Seperti juga porselin, ia merupakan bahan penyekat yang baik.
- Lebih kuat dari porselin.
- Dalam keadaan tidak glazuur Steatit tidak menghisap air.

Pemakaian :

- Sebagai alat – alat penghubung (untuk penyekat) kotak kontak dinding.
- Karena bahan steatite merupakan bahan yang bebas kerugian pada frekuensi tinggi, maka bahan ini banyak dipergunakan pada teknik radio, dalam perdagangan disebut dengan nama frekuentit, Radiolit dan sebagainya.

#### 4.13.3 Mayolika

Mayolika merupakan bahan keramik yang amat halus, terbuat tanah liat yang mengandung besi.

Mayolika banyak dipakai pada ornament – ornament listrik.

#### 4.13.4 Lak Isolasi

Bahan dasar yang digunakan sebagai lak isolasi adalah :

- Minyak kayu
- Minyak cat
- Minyak dammar
- Minyak visinus
- Bahan – bahan bitumen

Untuk mengencerkan dipakai :

- Bensin
- Bensol
- lak isolasi
- Lak kering udara (lak qelulose)
- Lak cepat kering
- Lak kering dalam dapur.

Tujuan lak isolasi adalah untuk mencelup atau melapis bahan serat yang dipakai dalam teknik listrik untuk mendapatkan permukaan yang licin.

Sifat – sifat lak isolasi :

- Daya sekatnya tinggi.
- Tahan air
- Tahan minyak
- Tahan asam
- Turut memperbesar kekuatan mekanis

Pemakaian lak isolasi :

- Dipergunakan untuk mencelupkan dan melapisi lilitan jangkar mesin – mesin listrik, kumparan dari transformator dan sebagainya.

#### 4.14. Kaca

Kaca adalah substansi yang dibuat dengan pendinginan bahan-bahan yang dilelehkan, tidak berbentuk kristal tetapi tetap pada kondisi berongga. Kaca pada umumnya terdiri dari campuran silikat dan beberapa senyawa antara lain : borat, pospat. Kaca dibuat dengan cara melelehkan beberapa senyawa silikat (pasir), alkali (Na dan K) dengan bahan lain (kapur, oksida timah hitam). Karena itu sifat dari kaca tergantung dari komposisi bahan-bahan pembentuknya tersebut. Massa jenis kaca berkisar antara 2 hingga 8,1 g/cm<sup>3</sup>, kekuatan tekannya 6000 hingga 21000 kg/cm<sup>2</sup>, kekuatan tariknya 100 hingga 300 kg/cm<sup>2</sup>. Karena kekuatan tariknya relatif kecil, maka kaca adalah bahan yang regas. Walaupun kaca merupakan substansi berongga, tetapi tidak mempunyai titik leleh yang tegas, karena pelelehannya adalah perlahan-lahan ketika suhu pemanasan di naikkan. Titik pelelehan kaca berkisar antara 500 hingga 1700<sup>0</sup> C. Makin sedikit kandungan S<sub>1</sub>O<sub>2</sub> nya makin rendah titik pelembekan suatu kaca. Demikian pula halnya dengan muai panjang ( $\alpha$ ) nya, makin banyak kadar S<sub>1</sub>O<sub>2</sub> yang dikandungnya akan makin kecil  $\alpha$  nya. Muai panjang untuk kaca berkisar antara 5,5 . 10<sup>-7</sup> hingga 150. 10<sup>-7</sup> per derajat celcius. Nilai dari angka muai panjang adalah sangat penting bagi suatu kaca dalam hubungannya dengan kemampuan kaca menahan perubahan suhu. Piranti dari kaca yang dipanaskan atau didinginkan secara tiba-

tiba akan meregang. Hal ini disebabkan distribusi suhu tidak merata pada lapisan luarnya dan keadaan tersebut menyebabkan retaknya piranti. Jika kekuatan tarik dari piranti kaca lebih rendah daripada kekuatan tekannya, maka pendinginan yang mendadak pada permukaannya akan lebih memungkinkan terjadinya keretakan dibandingkan dengan pemanasan tiba-tiba. Kaca silika jenis Red-Hot akan lebih aman dalam hal pendinginan atau pemanasan tiba-tiba, karena kaca jenis ini mempunyai  $\alpha$  yang sangat rendah. Piranti kaca yang didinginkan tipis, ketahanannya terhadap perubahan panas mendadak lebih baik dibandingkan dengan piranti kaca yang dindingnya tebal. Hal ini karena dipengaruhi faktor kerataan pemuai permukaan kaca bagian luar dan dalam dinding piranti adalah tidak sama. Kaca yang digunakan untuk suatu perangkat dan pada perangkat tersebut terdapat juga logam, misalnya: lampu pijar, tabung sinar katode; maka nilai  $\alpha$  nya harus disesuaikan, yaitu harus rendah karena selalu bekerja pada suhu yang cukup tinggi. Dengan demikian maka tidak terjadi keretakan dibagian kacanya pada waktu perangkat tersebut digunakan. Kemampuan larut kaca terhadap bahan lain akan bertambah sesuai dengan kenaikan suhunya. Kaca yang mempunyai kekuatan hidrolitik rendah ketahanan permukaannya pada media yang lembab adalah kecil. Kaca silika mempunyai ketahanan hidrolitik yang paling tinggi. Kekuatan hidrolitik akan sangat berkurang jika kaca diberi alkali. Pada kenyataannya kaca silika adalah tidak peka terhadap asam kecuali asam fluorida. Pada pabrikasi kaca, asam fluorida digunakan untuk membuat kaca embun. Pada umumnya kaca tidak stabil terhadap pengaruh alkali. Sifat-sifat elektris dari kaca dipengaruhi oleh komposisi dari kaca itu sendiri.

Kaca yang digunakan untuk teknik listrik pada suhu normal diperlukan syarat-syarat antara lain : resistivitas berkisar antara  $10^8$  hingga  $10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ , permitivitas relatif  $\epsilon_r$  berkisar antara 3,8 hingga 16,2, kerugian sudut dielektriknya ( $\tan \delta$ ) 0,0003 hingga 0,01, tegangan break-down 25 hingga 50 kV/ mm. Kaca silika mempunyai sifat kelistrikan yang paling baik. Pada suhu kamar besarnya resistivitas adalah  $10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $\epsilon_r$  3,8 dan  $\tan \delta$  pada 1 M Hz adalah 0,0003. Jika kaca silika ditambahkan natrium atau kalium, maka resistivitasnya akan turun,  $\tan \delta$  nya akan naik sedikit. Kaca yang mengandung oksida-oksida 2 logam alkali yang berbeda dimungkinkan mempunyai sifat isolasi yang lebih tinggi dibandingkan jika kuantitas oksidanya hanya mengandung 1 bagian dari kuantitas oksida 2 logam (efek netralisasi atau polialkalin). Kemampuan isolasi kaca juga dapat lebih baik jika padanya ditambah PbO atau BaO.

Kaca dibuat dengan cara mendinginkan secara cepat beberapa bahan yang dilelehkan atau kristalisasi. Proses tersebut dinamakan devritivikasi. Pendinginan yang cepat tersebut diikuti dengan naiknya kekentalan substansi atau pembentukan keadaan kristal. Pabrikasi kaca diawali dengan pemotongan, penghalusan dan mencampur bahan-bahan mentah antara lain : pasir silika ( $\text{SiO}_2$ ), soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), kapur ( $\text{Ca CO}_3$ ), Kalsium magnesium karbonat ( $\text{Ca CO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ), borak ( $\text{Na B}_4\text{O}_7$ ), asam borik ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ), minium ( $\text{Pb}_3\text{O}_4$ ), tanah kaolin dan feldspar. Semua bahan tersebut difusikan. Kaca dapat dilelehkan dalam suatu wadah yang kapasitasnya dapat mencapai 2 ton bahan mentah. Setelah bahan-bahan tersebut meleleh (bahan –bahan yang mudah menguap hilang dengan sendirinya) Maka terjadi reaksi antara komponen-komponen pembentuknya. Kaca yang masih dalam keadaan lunak disebut metal. Metal ini selanjutnya dihaluskan kembali di dalam sebuah tangki khusus. Dari tangki ini kaca diambil untuk dibentuk. Karena kaca kental adalah kenyal, maka sangat mudah dibentuk yaitu dengan : peniupan (misalnya untuk : bola lampu, piranti gelas reaksi), penarikan (misalnya : tatakan gelas, pipa, dan tabung) atau dengan penekanan dan pencetakan. Kaca yang masih panas dapat disolder dengan baik satu sama lain seperti halnya logam.

Umumnya kaca diproduksi dengan bentuk datar antara lain :kaca jendela dan bentuk kemasan antara lain : botol, bola lampu. Setelah pembentukan, kaca harus didinginkan perlahan-lahan dalam sistem anealing, biasanya dilakukan dalam oven panjang yang disebut lehr. Pendinginan perlahan-lahan ini adalah sangat penting dilakukan untuk mengurangi regangan termal dalam. Regangan ini kemungkinan besar dapat menyebabkan retaknya kaca ketika terjadi pendinginan. Kaca dingin dapat direkayasa yaitu dengan pemotongan menggunakan intan pemotong, pembubutan, perataan, pengeboran (mata bornya adalah logam yang ekstra keras misalnya : pobedit atau dengan bor perunggu yang menggunakan berbagai abrasip), kaca juga dapat dipoles.

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, kaca silika mempunyai sifat isolasi yang tinggi, ketahanan panas yang tinggi dan kuat terhadap pengaruh hidrolitik. Pabrikasi piranti kaca silika menggunakan dapur tinggi khusus. Terdapat 2 macam kaca silika, yaitu : kaca silika bening dan kaca silika tidak bening tetapi tembus cahaya (translucent). Kaca silika bening mempunyai sifat yang lebih baik daripada kaca silika yang tidak bening. Pada kaca silika yang tidak bening terdapat gelembung-gelembung udara di dalamnya. Hal ini dapat dimaklumi, karena proses

pembuatan kaca silika bening lebih sulit daripada kaca silika tidak bening. Jika kristal kuarsa dalam jumlah besar diperlukan, bisa digunakan pasir kuarsa biasa (pasir kali). Massa jenis kaca silika adalah  $2,2 \text{ g/cm}^3$ . Kebanyakan kaca silika yang digunakan di dalam keteknikan mempunyai berbagai substansi yang ditambahkan ke  $\text{SiO}_2$ , sehingga membuatnya lebih mudah direkayasa, tetapi titik leburnya menjadi lebih rendah. Kaca silika di dalam keteknikan diklasifikasikan menjadi 3 kelompok yaitu:

**a. Kaca alkali tanpa oksida berat.**

Kaca ini mempunyai titik lebur yang agak rendah. Pemakaiannya antara lain untuk : botol, kaca jendela.

**b Kaca alkali yang mengandung oksida berat.**

Kaca ini mempunyai sifat kelistrikan yang tinggi dibandingkan dengan kaca alkali kelompok 1. Kaca Flint ditambah dengan  $\text{PbO}$  atau kaca Crown ditambah dengan  $\text{BaO}$  digunakan sebagai kaca optik. Kaca khusus untuk bahan dielektrik kapasitor adalah kaca flint yang disebut Minos. Diantara kaca-kaca crown terdapat jenis yang disebut Pireks. Pireks mempunyai koefisien termal  $33 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}$  dan mampu menahan perbedaan suhu yang mendadak.

**c. Kaca non alkali.**

Penggunaan kaca ini adalah sebagai kaca optik dan bahan isolasi listrik. Beberapa jenis kaca dari kelompok ini mempunyai titik lebur yang sangat tinggi. Pemakaian kaca pada keteknikan antara lain :

- Pembuatan bola lampu, tabung elektronik, penyangga filamen. Titik lebur kaca ini tidak terlalu tinggi, mulai panjangnya hendaknya dibuat mendekati muai panjang logam maupun paduannya yang disangga. Logam yang dimaksud adalah : wolfram, molibdenum.
- Minos adalah salah satu jenis kaca yang mempunyai permeabilitas relatif tinggi yaitu  $7,5$  sudut kerugian dielektrik ( $\tan \delta$ ) kecil pada frekuensi  $1 \text{ MHz}$ , suhu  $20^\circ \text{C}$ ,  $\tan \delta = 0,0009$  pada frekuensi  $1 \text{ MHz}$ , suhu  $200^\circ \text{C}$ ,  $\tan \delta = 0,0012$ . Kaca minos mempunyai  $\alpha = 82 \cdot 10^{-7} \text{ per } ^\circ \text{C}$ , massa jenis  $3,6 \text{ g/cm}^3$ .
- Untuk membuat berbagai isolator.  
Misalnya : isolator penyangga, isolator antena, isolator len dan isolator bushing.

Untuk keperluan pelapisan ini koefisien muai panjang enamel harus diusahakan sama dengan muai panjang perangkat yang dilapisi. Komponen enamel untuk pelapisan resistor tabung (kaca boron-timah hitam dengan mangan peroksida) adalah sangat sederhana yaitu :  $27\% \text{ PbO}$ ,  $70\% \text{ H}_3\text{O}_3$  dan  $3\% \text{ MnO}_2$ . Titik lebur enamel  $\pm 600^\circ \text{C}$ . Enamel akan hilang warnanya dan sebagian akan melarut jika diredam di dalam air dalam waktu yang lama. Untuk menambah ketahanan enamel terhadap air dan panas biasanya ditambahkan pasir kuarsa. Sedangkan untuk menambahkan kemampuan lekatnya enamel yang digunakan melapisi baja atau besi tuang, ditambah  $\text{Ni}$  dan  $\text{Co}$ .

**4.14.1 Sitol**

Sitol mempunyai bahan dasar kaca yang merupakan pengembangan baru. Pemakaian sitol adalah sangat luas, struktur dan sifat-sifatnya adalah diantara kaca dan keramik. Sitol juga disebut keramik-kaca atau kaca kristal. Yang banyak dijumpai dipasaran antara lain : pyroceram, vitoceram. Sitol mempunyai struktur kristal yang halus (hal ini yang membedakannya dengan kaca biasa) tetapi berongga. Tidak seperti halnya keramik biasa, sitol tidak dibuat dengan pembakaran tetapi cenderung dengan fusi dari bahan-bahan mentahnya dengan menjadikannya meleleh dan kemudian kristalisasi. Agar bahan ini mempunyai ketahanan terhadap suhu dan kelistrikan lebih baik maka perlu bahan tambahan yaitu :  $\text{Fe S}$ ,  $\text{Ti O}_2$ , alkali fluorida, alkali fospat dan logam-logam alkali tanah. Sitol mempunyai sifat mekanis yang tinggi,  $\alpha$  yang rendah sehingga tahan terhadap perubahan suhu yang mendadak. Permittivitas relatif ( $\epsilon_r$ ) berkisar antara 5 sampai 6,  $\tan \delta$  pada frekuensi  $1 \text{ MHz}$  sekitar 0,01 dan pada  $10.000 \text{ MHz}$  sekitar 0,001

**4.15. Bahan plastic**

Bahan plastic yang dikenal ada 2 macam :

- Thermo plastic

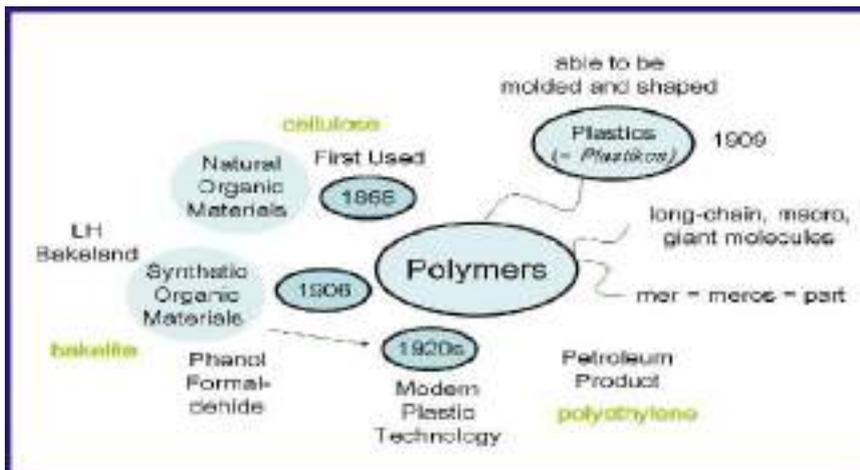
Bahan ini pada  $60^\circ \text{C}$  sudah menjadi lunak, pemakaian meskipun sampai mencair, tidak merusak/mengubah struktur kimianya.

- Thermostting plastik

Bahan ini setelah mengalami proses pencairan dan setelah dicetak menjadi barang jadi akan mengalami perubahan struktur kimia, sehingga tidak dapat lunak lagi walaupun dipanaskan.

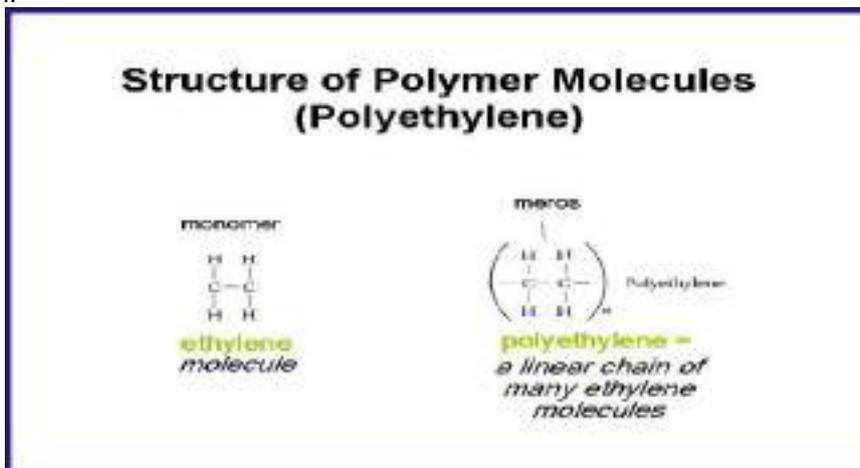
#### 4.15.1 Polimer.

Polimer adalah salah satu bahan rekayasa bukan logam (non-metallic material) yang penting. Saat ini bahan polimer telah banyak digunakan sebagai bahan substitusi untuk logam terutama karena sifat-sifatnya yang ringan, tahan korosi dan kimia, dan murah, khususnya untuk aplikasi-aplikasi pada temperatur rendah. Hal lain yang banyak menjadi pertimbangan adalah daya hantar listrik dan panas yang rendah, kemampuan untuk meredam kebisingan, warna dan tingkat transparansi yang bervariasi, kesesuaian desain dan manufaktur.



Gambar 4.17 Perkembangan Bahan Polimer

Istilah polimer digunakan untuk menggambarkan bentuk molekul raksasa atau rantai yang sangat panjang yang terdiri atas unit-unit terkecil yang berulang-ulang atau **mer** atau **meros** sebagai blok-blok penyusunnya. Molekul-molekul (tunggal) penyusun polimer dikenal dengan istilah **monomer**. Polimer Polyethylene, misalnya, adalah salah satu jenis bahan polimer dengan rantai linear sangat panjang yang tersusun atas unit-unit terkecil (**mer**) yang berulang-ulang yang berasal dari monomer molekul ethylene. Perhatikan bahwa monomer memiliki ikatan kovalen tak jenuh (ikatan ganda) sedangkan pada mer ikatan tersebut menjadi aktif atau ikatan kovalen terbuka dengan elektron tak berpasangan.



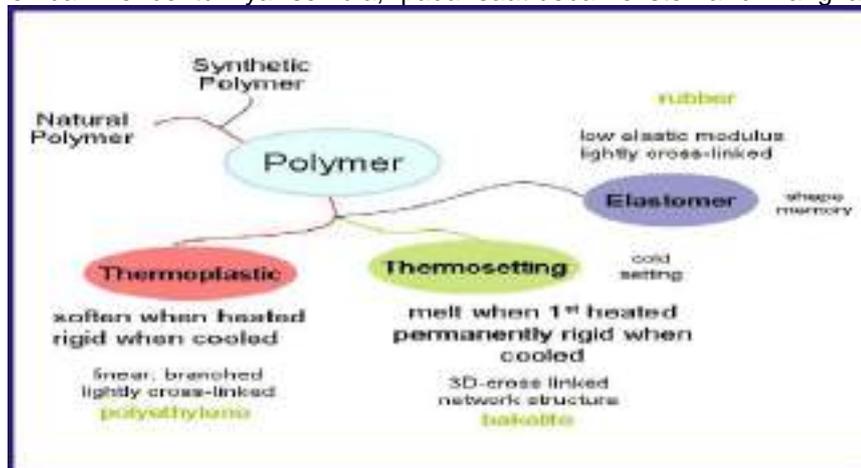
Gambar 4.18 Struktur Molekul Polimer Polyethylene

Bahan organik alam mulai dikenal dan digunakan sejak tahun 1866, yaitu dengan digunakannya polimer **cellulose**. Bahan organik buatan mulai dikenal tahun 1906 dengan ditemukannya polimer **Phenol Formaldehyde** atau **Bakelite**, mengabadikan nama penemunya L.H. Baekeland. Bakelite, hingga saat ini masih digunakan untuk berbagai keperluan. Para mahasiswa metalurgi atau metallographist profesional misalnya menggunakan bakelit untuk memegang (mounting) spesimen metalografi dari sampel logam yang akan dilihat struktur mikronya di bawah mikroskop optik reflektif.

Istilah plastik, yang sering digunakan oleh masyarakat awam untuk menyebut sebagian besar bahan polimer, mulai digunakan pada tahun 1909. Istilah tersebut berasal dari kata Plastikos yang berarti mudah dibentuk dan dicetak. Teknologi modern plastik baru dimulai tahun 1920-an, yaitu dengan mulai digunakannya polimer yang berasal dari produk derivatif minyak bumi, seperti misalnya **Polyethylene**. Salah satu jenis plastik yang sering kita jumpai adalah LDPE (Low Density Poly Ethylene) yang banyak digunakan sebagai plastik pembungkus yang lunak dan sangat mudah dibentuk.

Di samping pembagian di atas, yaitu natural polymer yang berasal dari alam (misalnya cellulose) dan synthetic polymer yang merupakan hasil rekayasa manusia (misalnya bakelite dan polyethylene), polimer umumnya dikelompokkan berdasarkan perilaku mekanik dan struktur rantai atau molekulnya. Polimer **thermoplastik**, misalnya polyethylene, adalah jenis polimer yang memiliki sifat-sifat thermoplastik yang disebabkan oleh struktur rantainya yang **linear (linear), bercabang (branched) atau sedikit bersambung (cross linked)**. Polimer dari jenis ini akan bersifat lunak dan viskos (**viscous**) pada saat dipanaskan dan menjadi keras dan kaku (**rigid**) pada saat didinginkan

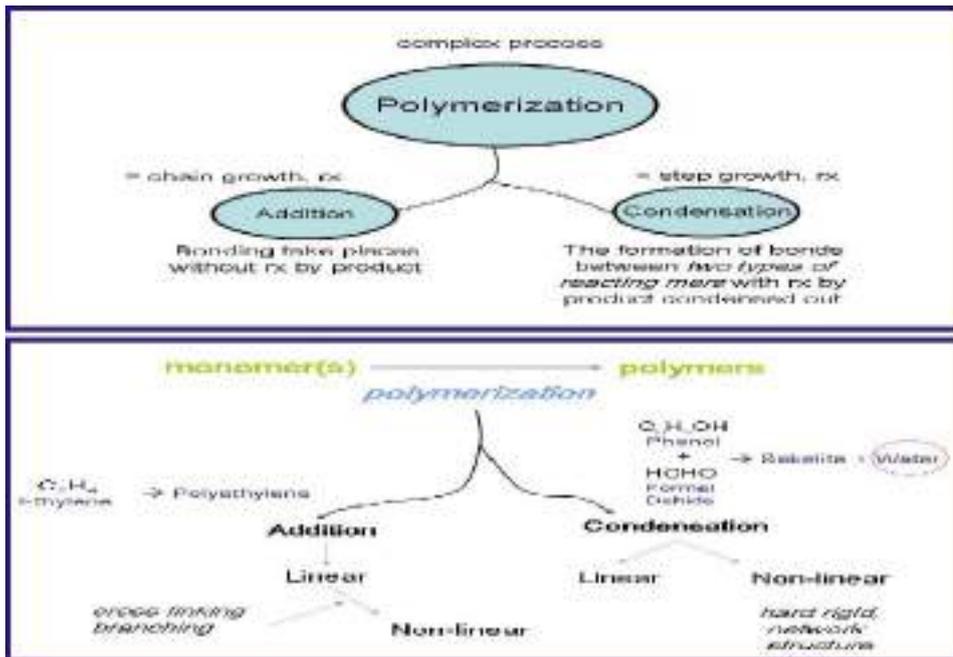
secara berulang-ulang. Sementara itu, polimer **thermoset (thermosetting)**, misalnya bakelite, hanya melebur pada saat pertama kali dipanaskan dan selanjutnya mengeras secara permanen pada saat didinginkan. Polimer jenis ini bersifat lebih keras dan kaku (**rigid**) karena strukturnya molekulnya yang membentuk jejaring tiga dimensi yang saling berhubungan (**network**). Polimer jenis elastomer, misalnya karet alam, memiliki daerah elastis non linear yang sangat besar yang disebabkan oleh adanya sambungan-sambungan antar rantai (**cross links**) yang berfungsi sebagai 'peringat bentuk' (**shape memory**) sehingga karet dapat kembali ke bentuknya semula, pada saat beban eksternal dihilangkan.



Gambar 4.19 Jenis-jenis Polimer

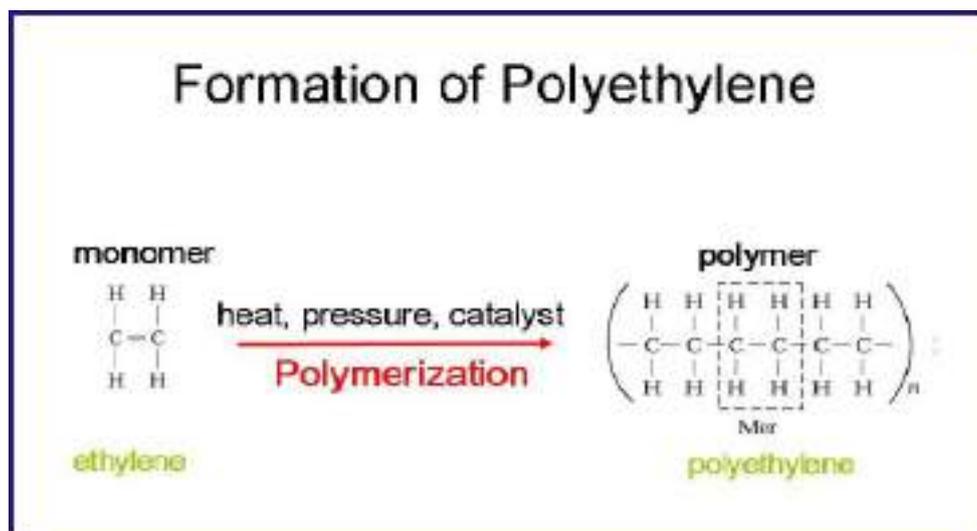
#### 4.15.2. Proses Pembentukan Polimer (Polimerisasi)

Proses pembentukan rantai molekul raksasa polimer dari unit-unit molekul terkecilnya (mer atau meros) melibatkan reaksi yang kompleks proses polimerisasi tersebut yang secara umum dapat dikelompokkan menjadi dua jenis reaksi, yaitu: (1) polimerisasi adisi (**Addition**), dan (2) polimerisasi kondensasi (**Condensation**). Reaksi adisi, seperti yang terjadi pada proses pembentukan makro molekul polyethylene dari molekul-molekul ethylene, berlangsung secara cepat tanpa produk samping (by-product) sehingga sering disebut pula sebagai Pertumbuhan Rantai (**Chain Growth**). Sementara itu, polimerisasi kondensasi, seperti yang misalnya pada pembentukan bakelit dari dua buah mer berbeda, berlangsung tahap demi tahap (**Step Growth**) dengan menghasilkan produk samping, misalnya molekul air yang dikondensasikan keluar.

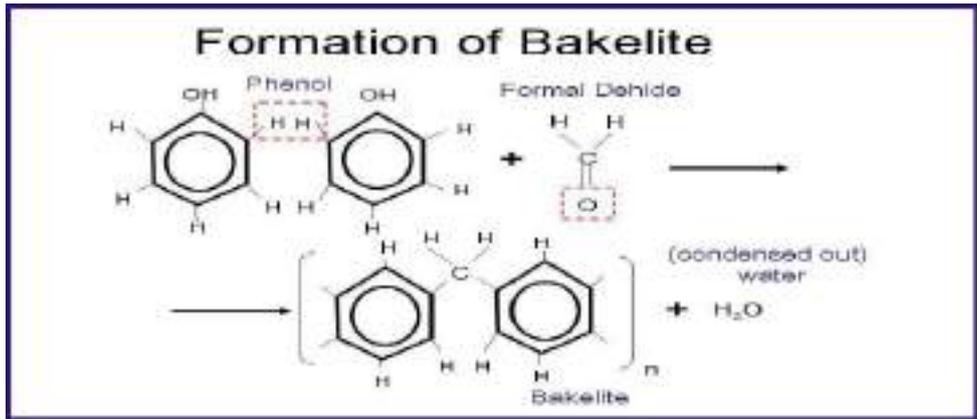


Gambar 4.20 Proses Pembentukan Polimer (Polimerisasi)

Contoh polimerisasi dengan reaksi adisi adalah proses pembentukan Polyethylene (PE). Proses pembentukan polimer berlangsung dalam 3 tahap, yaitu: (1) inisiasi, (2) adisi atau pertumbuhan rantai, dan (3) terminasi. Untuk memulai proses polimerisasi ethylene, ditambahkan  $H_2O_2$  sehingga terjadi pemutusan ikatan kovalen antar oksigen dalam molekul Hidrogen Peroksida dan ikatan kovalen antar karbon dalam molekul Ethylene. Polimerisasi dimulai dengan terbentuknya dua kelompok inisiator (OH) dan mer. Satu dari dua kelompok OH selanjutnya akan bergabung dengan mer ethylene mengawali terbentuknya rantai molekul polimer. Selanjutnya akan terjadi pertumbuhan rantai yang berlangsung sangat cepat membentuk rantai molekul raksasa linear. Terminasi dari pertumbuhan rantai dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu (1) dengan bergabungnya OH ke ujung rantai molekul, dan (2) bergabungnya dua rantai molekul. Panjang dari rantai polimer dapat dikendalikan dengan cara mengendalikan jumlah inisiator. Secara umum, jika jumlah inisiator yang diberikan sedikit, maka jumlah OH yang tersedia untuk menghentikan reaksi semakin sedikit pula. Yang perlu dicatat adalah bahwa di reaksi adisi ini tidak menghasilkan produk sampingan (by product).



Gambar 4.21 Proses Pembentukan Polyethylene



Gambar 4.22 Proses Pembentukan Bakelite

Contoh dari polimerisasi kondensasi adalah proses pembentukan Bakelit yang telah kita kenal sebelumnya. Nama kondensasi diberikan karena pada proses polimerisasi ini dikondensasikan molekul air sebagai produk sampingan (by product)-nya. Bakelit, produk utama dari reaksi ini, terbentuk dari dua jenis molekul mer, yaitu Phenol dan Formal Dehide. Tidak seperti halnya pada polimerisasi adisi, reaksi berlangsung lebih lambat, tahap demi tahap, sehingga sering pula disebut sebagai reaksi pertumbuhan tahap demi tahap (step growth reaction). Rantai molekul yang terbentuk dalam proses polimerisasi bakelit ini lebih rigid, karena membentuk jejaring tiga dimensi (three dimensional network) yang kompleks.

#### 4.15.3. Berat Molekul dan Derajat Polimerisasi

Panjang rata-rata dari rantai polimer dapat dilihat dari berat molekul (molecular weight) polimer. Berat molekul dari polimer pada dasarnya adalah penjumlahan dari berat molekul-molekul mer-nya. Jadi semakin tinggi berat molekul dari suatu polimer tertentu, semakin besar panjang rata-rata dari rantai polimernya. Mengingat polimerisasi adalah peristiwa yang terjadi secara acak, maka berat molekul biasanya ditentukan secara statistik dalam bentuk rata-rata berat molekul atau distribusi berat molekulnya.

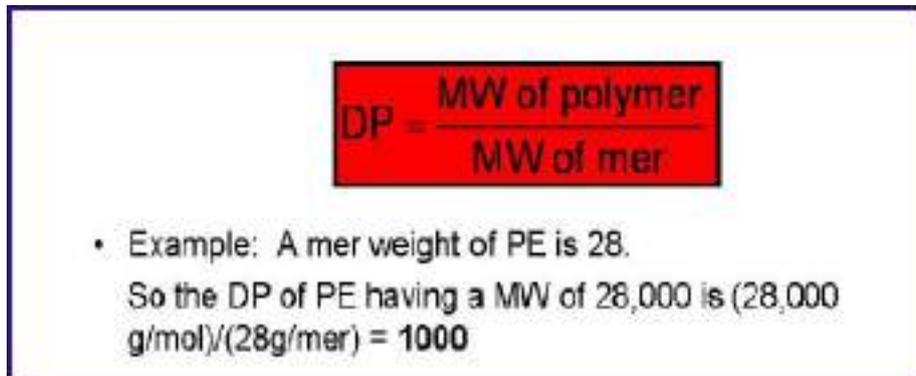
Suatu polimer thermoplastik misalnya, memiliki distribusi berat molekul sebagaimana terlihat dalam gambar berikut ini. Distribusi berat molekul tersebut terjadi karena proses polimerisasi terjadi secara acak (random) sehingga thermoplastik tersebut terdiri atas banyak rantai-rantai polimer yang berbeda-beda panjangnya. Dari distribusi tersebut dapat ditentukan rata-rata berat molekul dari thermoplastik tersebut.

Molecular Weight Range, g/mol	<i>M<sub>i</sub></i>	<i>f<sub>i</sub></i>	<i>f<sub>i</sub>M<sub>i</sub></i>
5,000-10,000	7,500	0.11	825
10,000-15,000	12,000	0.17	2,125
15,000-20,000	17,500	0.28	4,550
20,000-25,000	22,500	0.22	4,950
25,000-30,000	27,500	0.14	3,850
30,000-35,000	32,500	0.10	3,250
Average Molecular Weight = (19,550)/(1.00) = 19,550 g/mol		$\Sigma = 1.00$	$\Sigma = 19,550$

Gambar 4.23 Berat Molekul Rata-rata suatu Thermoplastik

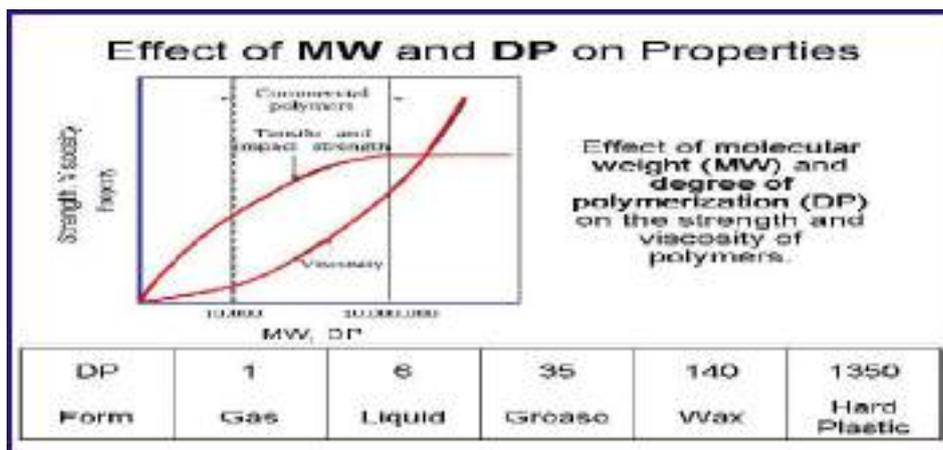
Derajat polimerisasi (DP) dari suatu polimer adalah rasio atau perbandingan berat molekul polimer dengan berat molekul mer-nya. Suatu polyethylene (PE) dengan berat molekul

28.000 g misalnya, memiliki derajat polimerisasi 1000 karena berat molekul dari mer-nya (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) adalah 28 (12x2 + 1x4). DP menggambarkan ukuran molekul dari suatu polimer berdasarkan atas jumlah dari monomer penyusunnya.



Gambar 4.24 Derajat Polimerisasi dari suatu Polimer, yaitu Polyethylene

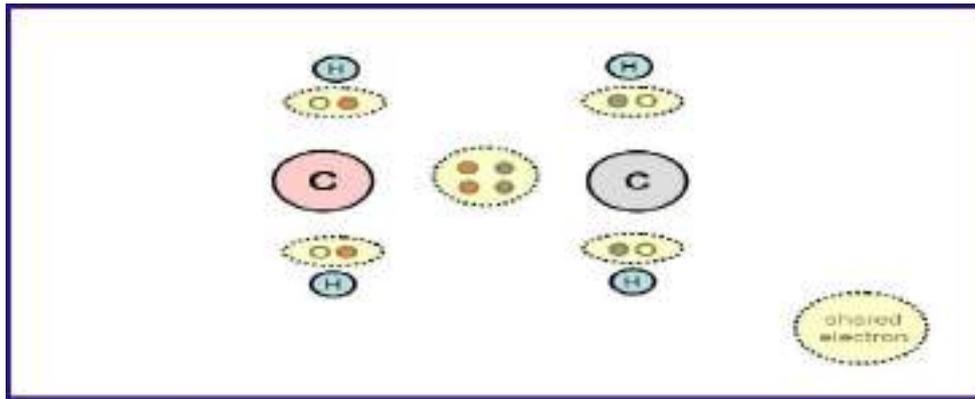
Berat molekul rata-rata atau derajat polimerisasi dari suatu polimer thermoplastik sangat berpengaruh terhadap keadaan dan sifat-sifatnya. Viskositas dan kekuatan polimer misalnya akan meningkat dengan meningkatnya berat molekul atau derajat polimerisasinya. Sebagai ilustrasi, kita dapat membandingkan keadaan dari monomer ethylene pada derajat polimerisasi yang berbeda-beda. Perbedaan dari sifat-sifat tersebut dapat dijelaskan oleh fakta bahwa semakin panjang rantai molekul suatu polimer, semakin besar energi yang diperlukan untuk mengatasi ikatan sekundernya.



Gambar 4.25 Effect MW and DP on properties

#### 4.15. 4 Ikatan-ikatan dalam Polimer

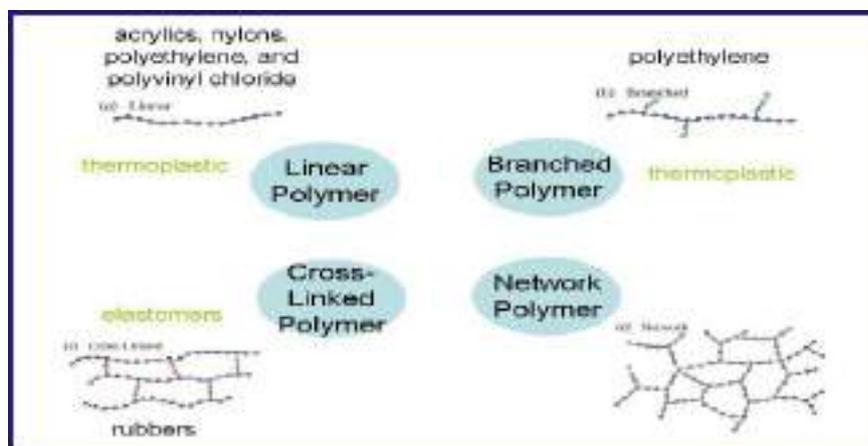
Ikatan-ikatan dalam polimer dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok, yaitu ikatan primer dan ikatan sekunder. Ikatan primer dari suatu polimer adalah ikatan kovalen, yaitu ikatan antar atom dengan cara memakai elektron secara bersama-sama, sebagaimana diilustrasikan dalam gambar. Ikatan-ikatan sekunder yang penting di dalam polimer misalnya adalah ikatan Van der Waals, ikatan Hidrogen, dan ikatan Ionik. Ikatan primer kovalen termasuk ikatan antar atom yang sangat kuat, jauh lebih kuat jika dibandingkan dengan ikatan-ikatan sekunder, 10 hingga 100 kalinya. Kekuatan ikatan primer ganda antar atom karbon di dalam ethylene (C=C), misalnya besarnya adalah 721 kJ/(g.mol), sedangkan ikatan antar atom karbon dan hidrogen (C-H) adalah 436 kJ/(g.mol).



Gambar 4.26 Ikatan Primer Kovalen di Dalam Molekul thylene C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>

#### 4.15.5 Struktur Rantai Molekul Polimer.

Arsitektur polimer sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat dan perilakunya secara umum. Secara umum, polimer dapat dikelompokkan menjadi empat jenis berdasarkan struktur molekulnya, yaitu: (1) polimer linear (linear polymer), (2) polimer bercabang (branched polymer), (3) polimer berkait (cross-linked polymer), dan (4) polimer berjejaring (network polymer). Polyethylene adalah contoh dari jenis polimer dengan struktur rantai linear dan bercabang. Struktur rantai tersebut menyebabkan polyethylene berperilaku termoplastik, yaitu dapat dibentuk menjadi suatu bentuk tertentu dan dikembalikan ke bentuk semula. Struktur rantai molekul berkait adalah struktur rantai yang khas dari karet yang memiliki daerah elastis non-linear yang sangat besar. Cross-link atau kaitan antar rantai dalam hal ini berfungsi sebagai 'pengingat bentuk' (shape memory) dari karet. Bakelite salah satu contoh polimer yang telah kita bahas sebelumnya memiliki struktur rantai molekul berjejaring 3 dimensi yang kompleks. Struktur rantai ini sangat rigid sehingga polimer dengan struktur rantai ini akan berperilaku termoset, yaitu menjadi rigid secara permanen pada saat pertama kali didinginkan.

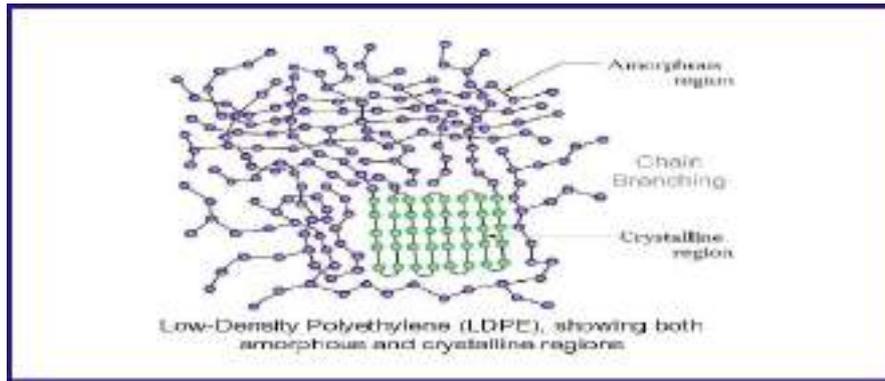


Gambar 4.27 Struktur Rantai Molekul Polimer

Secara umum, perilaku mekanik dari berbagai jenis polimer dapat dijelaskan dari ikatan-ikatan atom dan struktur rantai molekulnya.

#### 4.15.6 Derajat Kekristalan Polimer

Tidak seperti halnya logam, polimer pada umumnya bersifat amorphous, tidak bersifat kristalin atau memiliki keteraturan dalam rentang cukup panjang. Namun, polimer dapat direkayasa sehingga strukturnya memiliki daerah kristalin, baik pada proses sintesis maupun deformasi. Besarnya daerah kristalin dalam polimer dinyatakan sebagai derajat kekristalan polimer. Derajat kekristalan polimer misalnya dapat direkayasa dengan mengendalikan laju solidifikasi dan struktur rantai, walaupun sangat sulit untuk mendapatkan derajat kekristalan 100% sebagaimana halnya pada logam. Polimer dengan struktur rantai bercabang misalnya akan memiliki derajat kekristalan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan struktur tanpa cabang.



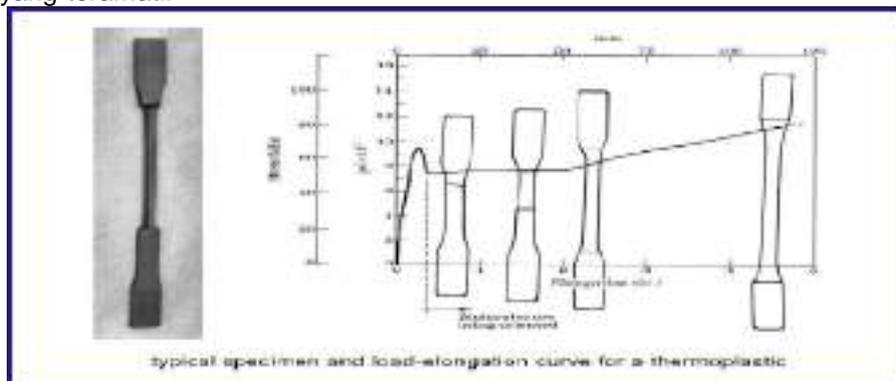
Gambar 4.28. Struktur Rantai Molekul PE Menunjukkan Daerah Kristalin (hijau) dan Daerah Amorphous (biru)

Sifat-sifat mekanik dan fisik dari polimer sangat dipengaruhi oleh derajat kekristalannya. Sifat-sifat mekanik yang dipengaruhi oleh derajat kekristalan misalnya adalah kekakuan (stiffness), kekerasan (hardness), dan keuletan (ductility). Sedangkan sifat-sifat fisik yang berhubungan dengan derajat kekristalan misalnya adalah sifat-sifat optik dan kerapatan (density) dari polimer.

#### 4.16. Perilaku Mekanika Polimer Thermoplastik

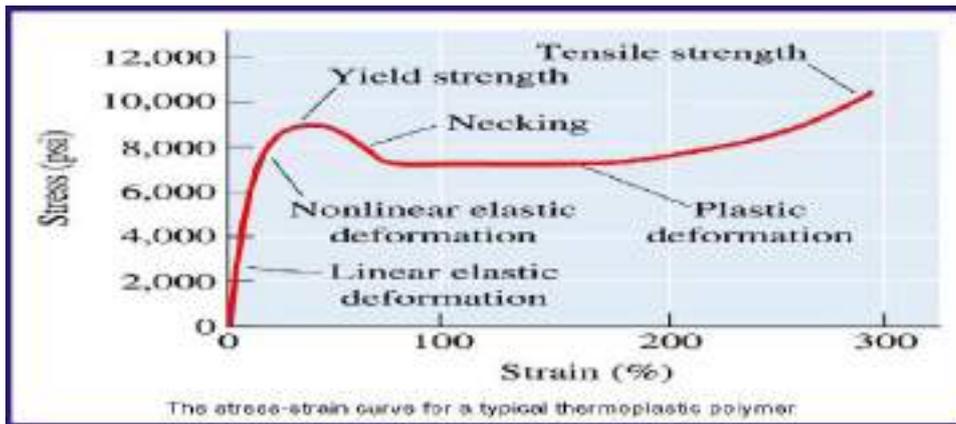
##### 4.16.1 Perilaku Thermoplastik Saat Dideformasi

Perilaku mekanika polimer thermoplastik sebagai respon terhadap pembebanan secara umum dapat dijelaskan dengan mempelajari hubungan antara struktur rantai molekulnya dan fenomena yang teramati.



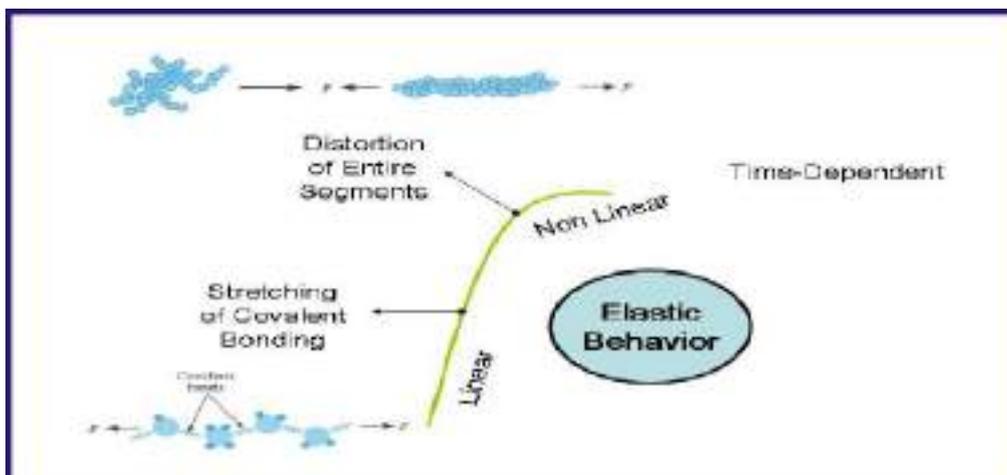
Gambar 4.29 Spesimen Uji Tarik dan Perilaku Polimer Thermoplastik pada Umumnya Saat Mengalami Pembebanan di Mesin Uji tarik

Perilaku mekanik dari polimer thermoplastik secara umum dapat dikelompokkan menjadi 3 bagian, yaitu: (1). Perilaku Elastik, (2). Perilaku Plastik, dan (3). Perilaku Visko-Elastik.



Gambar 4.30 Kurva Tegangan Regangan Suatu Polimer Thermoplastik

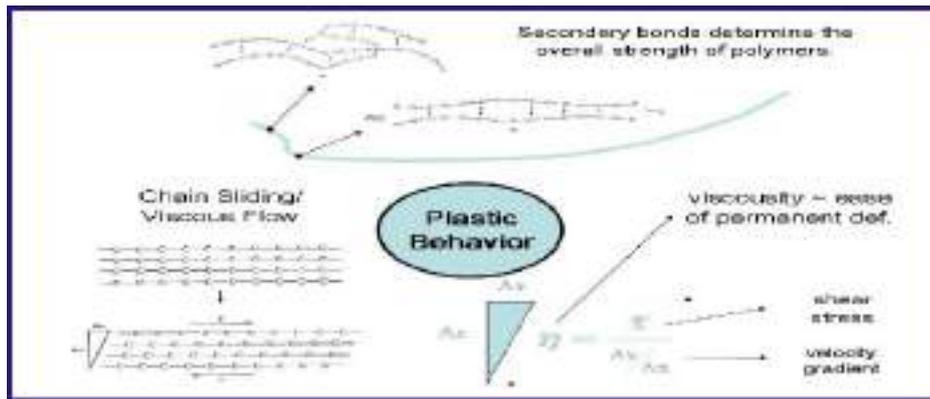
Perilaku thermoplastik secara umum adalah elastik non-linear yang tergantung pada waktu (time-dependent). Hal ini dapat dijelaskan dari 2 mekanisme yang terjadi pada daerah elastis, yaitu: (1) distorsi keseluruhan bagian yang mengalami deformasi, dan (2) regangan dan distorsi ikatan-ikatan kovalennya. Perilaku elastik non-linear atau non-proporsional pada daerah elastis terutama berhubungan dengan mekanisme distorsi dari keseluruhan rantai molekulnya yang linear atau linear dengan cabang.



Gambar 4.31 Perilaku Elastik Polimer Thermoplastik

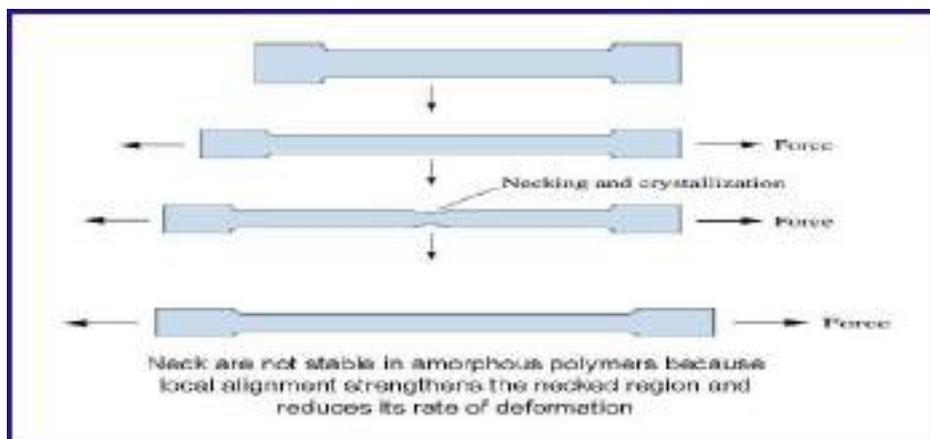
Perilaku plastis pada polimer thermoplastik pada umumnya dapat dijelaskan dengan mekanisme gelinciran rantai (chain sliding). Ikatan sekunder sangat berperan dalam mekanisme ini sebagaimana diilustrasikan dalam gambar. Mula-mula akan terjadi pelurusan rantai liner molekul polimer yang keadaannya dapat diilustrasikan seperti 'mie' dengan ikatan sekunder dan saling kunci mekanik. Selanjutnya akan terjadi gelinciran antar rantai molekul yang telah lurus pada arah garis gaya. Ikatan sekunder dalam hal ini akan berperan sebagai semacam 'tahanan' dalam proses gelincir atau deformasi geser (shear) antar rantai molekul yang sejajar searah dengan arah garis gaya.

Dengan demikian dapat dijelaskan bahwa ikatan sekunder sangat menentukan ketahanan polimer thermoplastik terhadap deformasi plastik atau yang selama ini kita kenal dengan kekuatan (strength) dari polimer. Gelinciran rantai molekul polimer thermoplastik dapat pula dilihat sebagai aliran viskos dari suatu fluida. Kemudahan molekul polimer untuk dideformasi secara permanen dalam hal ini berbanding lurus dengan viskositas dari polimer. Dari persamaan umum dapat dilihat bahwa tegangan geser akan menyebabkan gradien kecepatan antar rantai molekul yang dapat menyebabkan deformasi permanen tergantung pada viskositasnya.



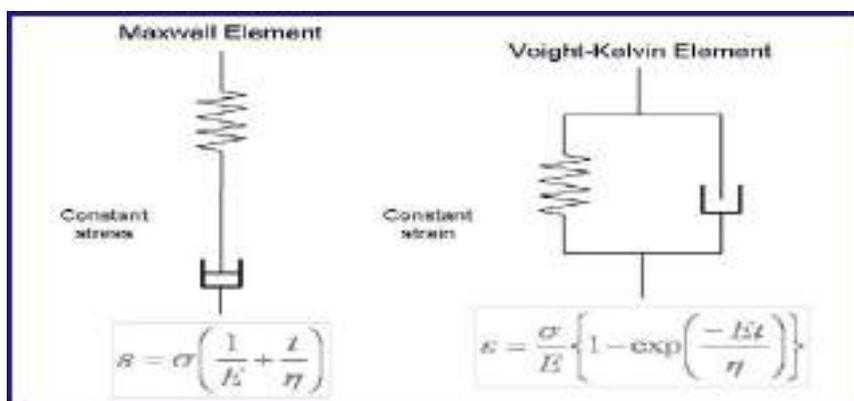
Gambar 4.32 Perilaku Plastik Polimer Thermoplastik

Perilaku penciutan (necking) dari polimer thermoplastik amorphous agak sedikit berbeda dengan perilaku penciutan logam pada umumnya. Hal ini disebabkan karena pada saat terjadi penciutan akan terjadi kristalisasi yang menyebabkan penguatan lokal pada daerah tersebut dan penurunan laju deformasi.



Gambar 4.33. Penciutan dan Kristalisasi Polimer Thermoplastik morphous pada Pengujian Tarik.

Visko-elastisitas berhubungan perilaku polimer thermoplastik saat dideformasi yang terjadi dengan deformasi elastis dan aliran viskos ketika beban diaplikasikan pada bahan. Hal ini berhubungan dengan ketergantungan perilaku bahan terhadap waktu pada saat deformasi elastis dan plastis. Secara sederhana perilaku viskoelastis dapat disimulasikan dengan mengkombinasikan persamaan Pegas Hooke dan Dashpot. Regangan, misalnya : dapat diasumsikan seri atau paralel, menggunakan Elemen Maxwell dan Elemen Voight-Kelvin.

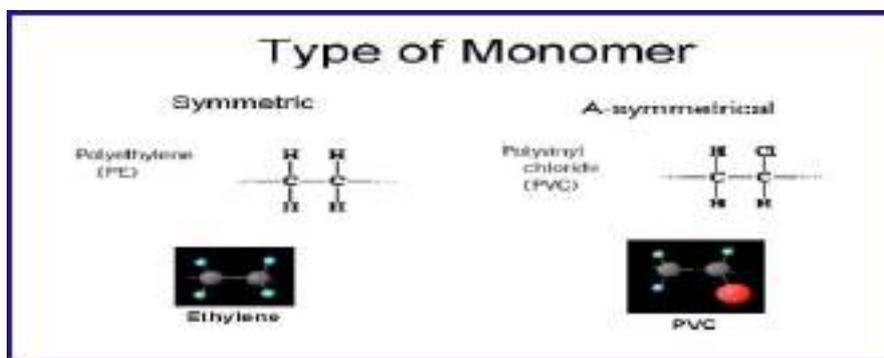


Gambar 4.34. Elemen Maxwell dan Voight-Kelvin untuk Mensimulasikan Perilaku Visko-elastik.

#### 4.16.2 Pengendalian Struktur dan Sifat-sifat Polimer Thermoplastik.

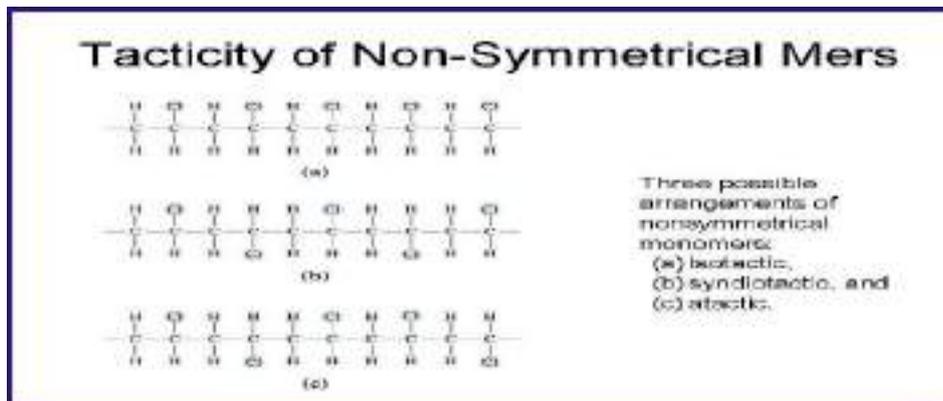
Dengan memahami hubungan struktur rantai molekul dan sifat-sifat tampak atau perilaku polimer maka kita dapat melakukan pengendalian struktur untuk mendapatkan sifat-sifat yang diinginkan. Sebelumnya telah dijelaskan misalnya hubungan antara Derajat Polimerisasi atau Distribusi Berat Molekul dengan sifat-sifat mekanik dan viskositas polimer. Telah dijelaskan bahwa dengan semakin panjangnya rantai molekul maka akan semakin besar energi yang diperlukan untuk mengatasi kekuatan dari ikatan-ikatan sekundernya yang semakin kompleks interaksinya. Semakin besar kerapatan antar rantai molekul semakin besar tegangan geser yang diperlukan untuk terjadinya deformasi akibat adanya gradien kecepatan.

Jenis monomer penyusun rantai molekul berpengaruh pula terhadap tahanan gelincir antar rantai molekul. Polimer yang tersusun atas mer yang a-simetris pada umumnya akan mengalami tahanan gelincir yang lebih besar daripada polimer dari mer simetris. Dari data-data yang ada dapat dilihat bahwa kekuatan dari polyethylene, yang memiliki monomer simetris dengan atom H di ke-empat ikatan kovalennya, misalnya, lebih rendah jika dibandingkan dengan kekuatan dari polimer asimetris seperti PVC yang satu atom Cl menggantikan atom H (vinyl compound).

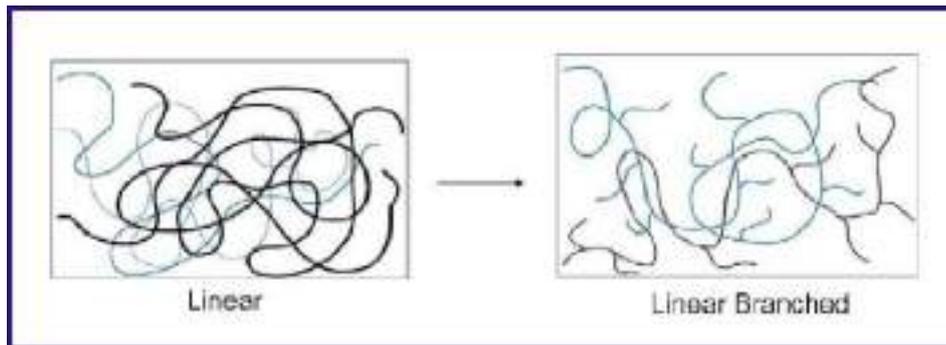


Gambar 4.35 Polimer Simetris dan Asimetris

Lebih jauh lagi, ke'taktik'an (tacticity) dari polimer asimetris akan berpengaruh pula terhadap sifat-sifatnya, sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 5.36 untuk polimer dari jenis mer asimetris yaitu vinyl chloride.



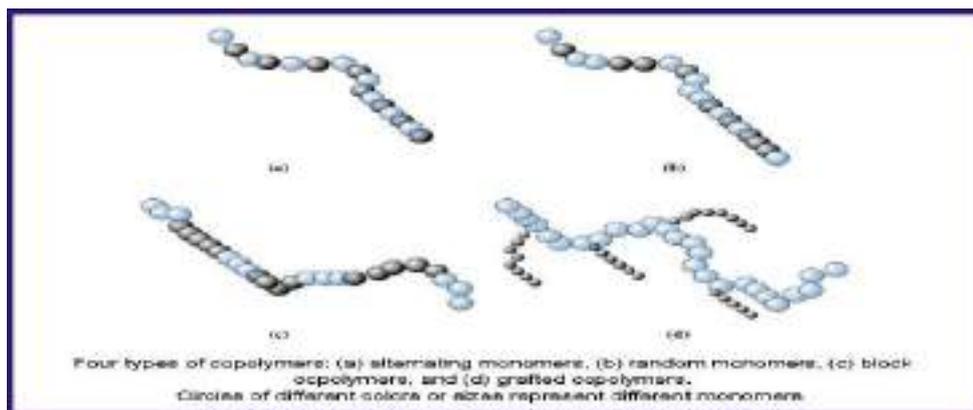
Gambar 4.36 Ke'taktik'an dari Polimer dengan mer Asimetris.



Gambar 4.37 Rantai Molekul Linier dan Linier dengan Cabang

Di samping itu, adanya cabang dapat pula memperbesar tahanan gelincir antar rantai molekul polimer yang saling bergerak relatif. Hal ini dengan mudah dapat dijelaskan karena adanya cabang yang menempel pada rantai molekul utama akan memperbesar tahanan gelincir antar rantai. Adanya cabang, di samping berpengaruh terhadap kerapatan polimer juga berpengaruh terhadap derajat kekristalan polimer yang pada akhirnya akan berpengaruh pula terhadap sifat-sifat dan perilaku yang tampak.

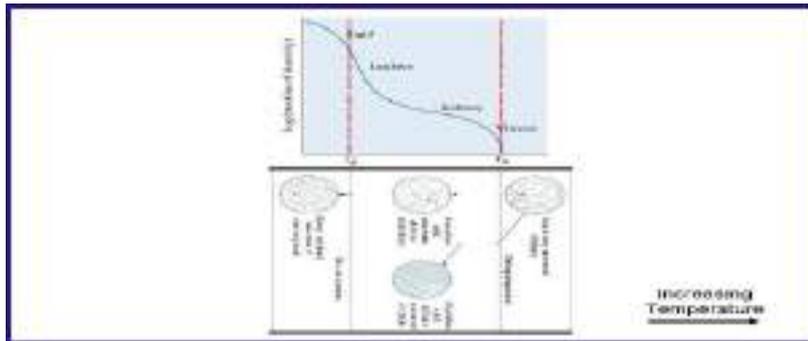
Di samping homo polimer, yaitu polimer dengan satu jenis mer, polimer dapat pula dibuat dengan lebih dari satu jenis mer dengan proses ko-polimerisasi, misalnya dengan dua jenis mer (ko-polimer) dan tiga jenis mer (ter-polimer) untuk menghasilkan sifat-sifat yang lebih baik. Jenis-jenis ko-polimerisasi juga akan berpengaruh terhadap sifat-sifat tampaknya.



Gambar 4.38 Ko-polimer dan 4 Jenis Ko-polimerisasi

#### 4.16.3 Pengaruh Kenaikan Temperatur dan Laju Regangan terhadap Polimer Thermoplastik

Tidak seperti halnya logam, polimer umumnya tidak memiliki temperatur lebur yang spesifik. Namun, polimer biasanya mengalami perubahan sifat-sifat atau perilaku mekanik yang jelas pada rentang temperatur tertentu yang sangat sempit. Temperatur di mana terjadi transisi temperatur tersebut dikenal sebagai temperatur gelas,  $T_g$  (Glass Temperature). Pada temperatur gelas, thermoplastik berubah keadaan dan perilakunya dari kaku, getas, padat seperti gelas menjadi fleksibel, lunak, elastis, seperti fluida (visko-elastik). Besarnya titik gelas ( $T_g$ ) tergantung pada struktur rantai molekul polimer yang umumnya sekitar  $2/3$  dari titik 'lebur'nya. Hubungan antara sifat-sifat mekanik (kekakuan) dari kenaikan temperatur serta perubahan pada struktur rantai molekulnya diilustrasikan dalam gambar berikut. Kurva tersebut dapat berubah dengan berubahnya kekristalan dan kaitan silang antar rantai molekul.



Gambar 4.39 Perubahan Kekakuan dan Struktur Polimer Thermoplastik akibat Kenaikan Temperatur.

Thermo-plastik pada umumnya sangat sensitif terhadap laju regangan. Hal ini dapat dilihat dari besarnya nilai sensitivitas regangan,  $m$  dari polimer yang sangat besar, sehingga memiliki daerah deformasi plastis seragam yang besar sebelum putus karena penciutan. Fenomena ini mirip dengan fenomena super plastisitas pada logam, yang memungkinkan bahan untuk dibentuk menjadi bentuk yang rumit dengan deformasi yang besar dengan proses pembentukan panas (thermoforming).

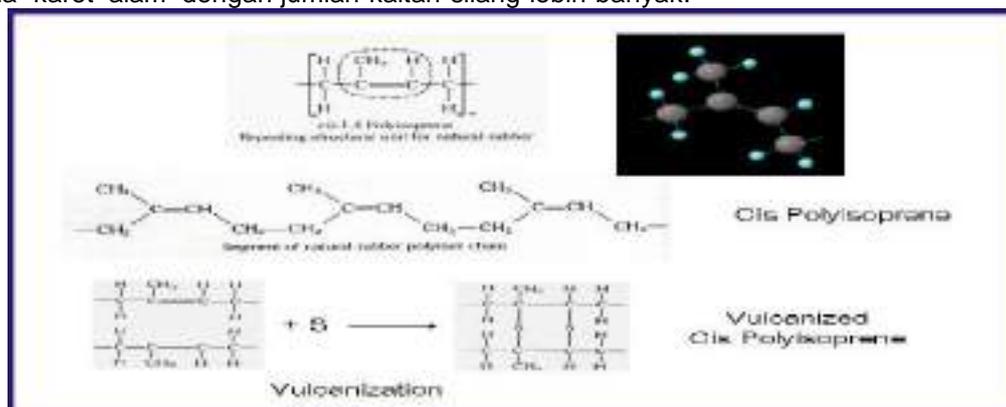
#### 4.16.3.1. Karet (Elastomer)

Karet atau elastomer adalah salah satu jenis polimer yang memiliki perilaku khas yaitu memiliki daerah elastis non-linear yang sangat besar. Perilaku tersebut ada kaitannya dengan struktur molekul karet yang memiliki ikatan silang (cross link) antar rantai molekul. Ikatan silang ini berfungsi sebagai 'pengingat bentuk' (shape memory) sehingga karet dapat kembali ke bentuk dan dimensi asalnya pada saat mengalami deformasi dalam jumlah yang sangat besar.

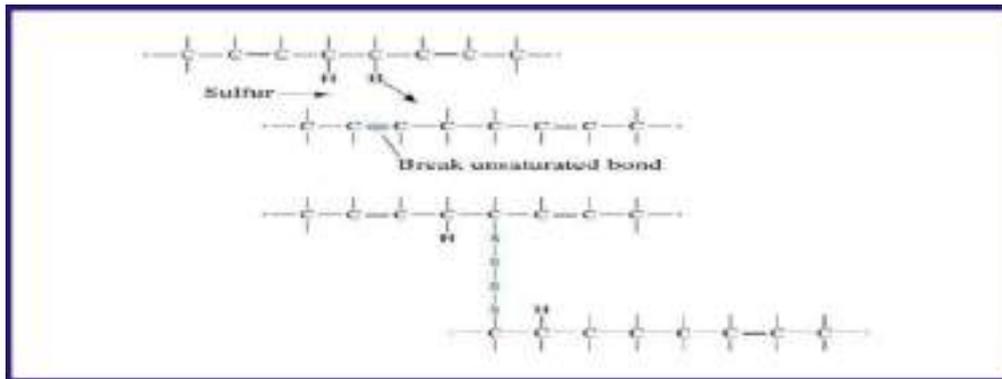
#### 4.16.3.2. Proses Pembuatan Karet

Karet alam (natural rubber) memiliki mer atau unit penyusun terkecil cis-polyisoprene. Proses pembuatan karet pada umumnya diikuti dengan proses vulkanisasi, yaitu penambahan Sulfur dengan tujuan untuk memperbaiki sifat-sifat mekanisnya. Gambar 5-23 mengilustrasikan proses pembuatan karet alam dengan vulkanisasi. Mekanisme dari penambahan kaitan silang dengan proses vulkanisasi karet alam diilustrasikan lebih jelas dalam Gambar 5-24.

Penambahan 30-40% Sulfur akan memperbanyak jumlah kaitan silang (cross link) antar rantai molekulnya yang akan berpengaruh terhadap sifat-sifat dan perilaku karet alam. Kekerasan dan kekakuan dari karet alam akan meningkat dengan proses vulkanisasi. Karet alam dengan jumlah kaitan silang sedikit akan bersifat relatif lebih lunak dan fleksibel daripada karet alam dengan jumlah kaitan silang lebih banyak.



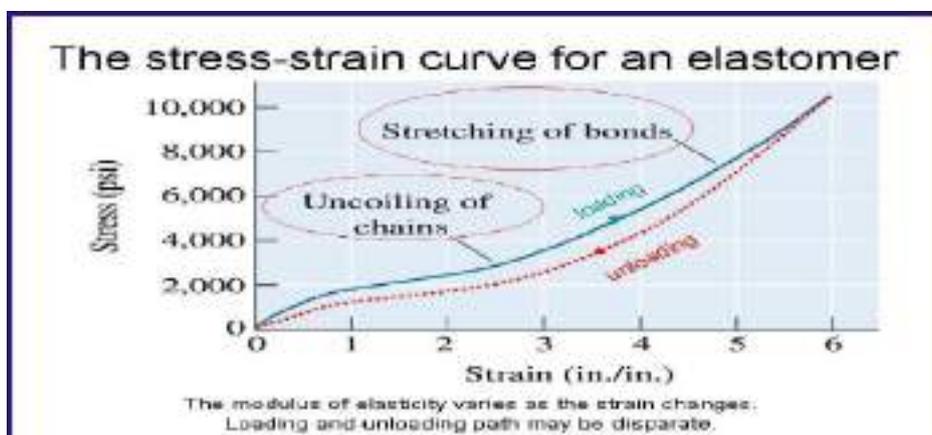
Gambar 4.40 Proses Pembuatan Karet Alam (Natural Rubber)



Gambar 4.41 Pembentukan Kaitan Silang (Cross Link) dengan Proses Penambahan Sulfur (Vulkanisasi)

#### 4.16.3.3 Perilaku Elastis Karet

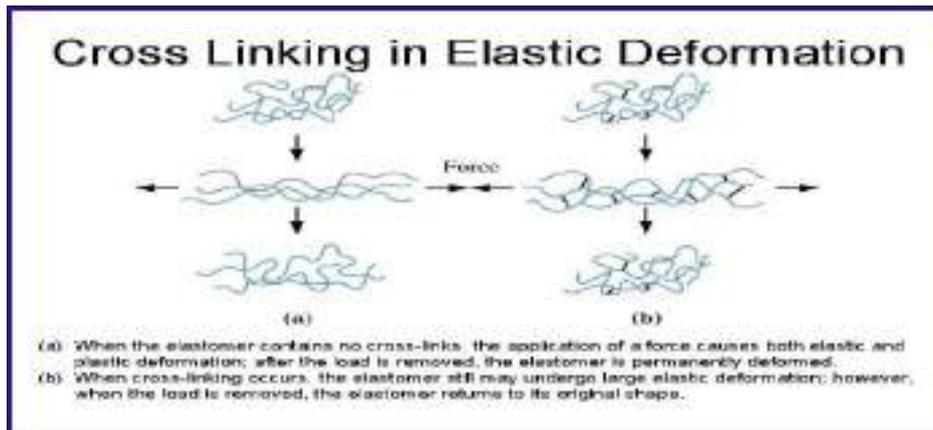
Karet, pada saat diberi pembebanan akan mengalami deformasi elastis non-linier dalam jumlah yang sangat besar (hingga 800%).



Gambar 4.42 Deformasi Elastis pada Karet.

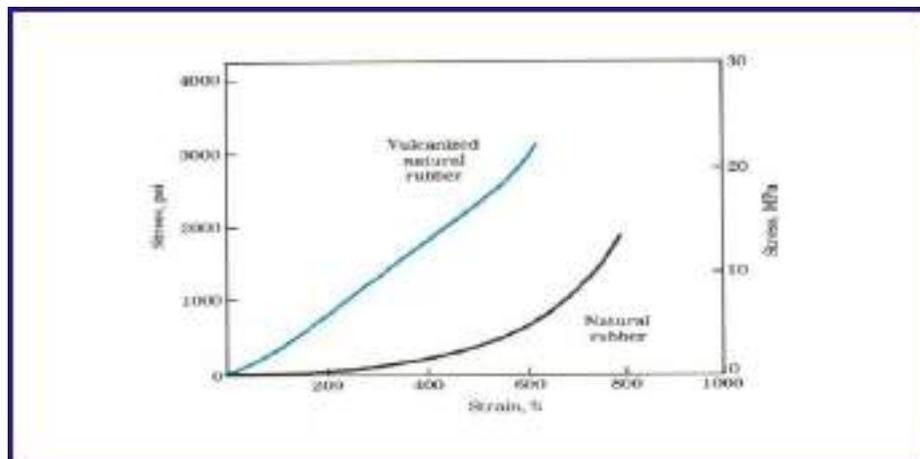
Perilaku karet yang terlihat hampir seluruhnya elastis dengan modulus elastisitas yang bervariasi dengan bertambahnya regangan. Mekanisme dasar yang terjadi pada proses deformasi elastis karet adalah (1) pelurusan dari gulungan rantai molekul, serta (2) peregangan dari ikatan-ikatan kovalennya. Sebagian memperlihatkan fenomena histerisis yang menunjukkan perbedaan lintasan regangan pada saat beban diberikan dan dilepaskan.

Kaitan silang sangat berperan di dalam menentukan perilaku elastik dari karet atau elastomer. Kaitan silang berfungsi sebagai penguat bentuk (shape memory) yang memungkinkan terjadinya deformasi elastis dalam jumlah yang sangat besar, sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 4.43. Tanpa adanya kaitan silang deformasi plastis akan mudah terjadi.



Gambar 4.43 Peran Kaitan Silang di Dalam Deformasi Elastis Karet.

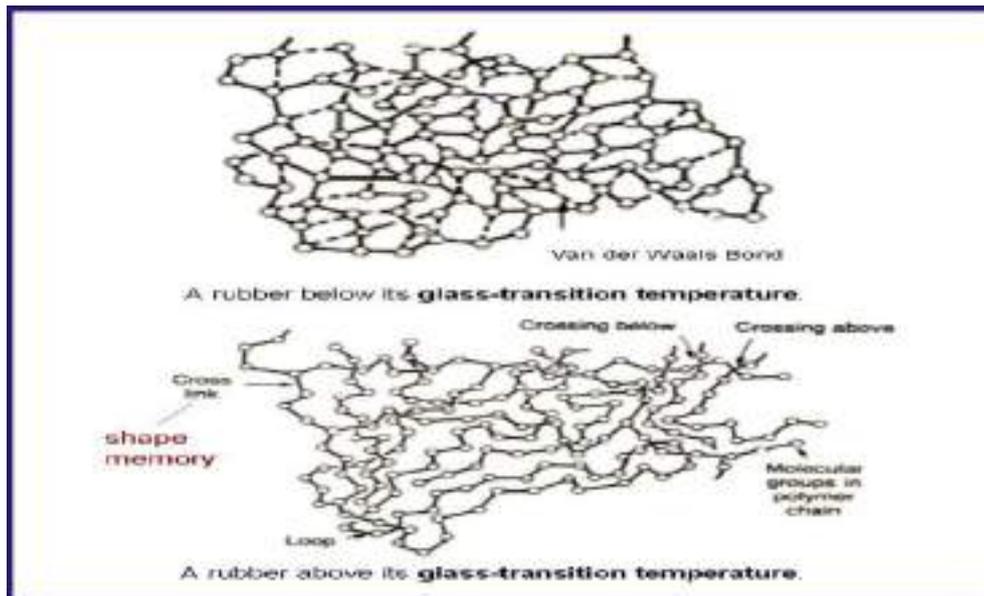
Adanya kaitan silang juga akan berpengaruh terhadap perilaku elastis dari karet atau elastomer sebagaimana diilustrasikan dalam gambar berikut. Karet alam yang telah divulkanisasi misalnya, akan memiliki jumlah kaitan silang lebih banyak sehingga modulus elastisitas atau kekakuannya lebih besar daripada karet alam yang belum divulkanisasi.



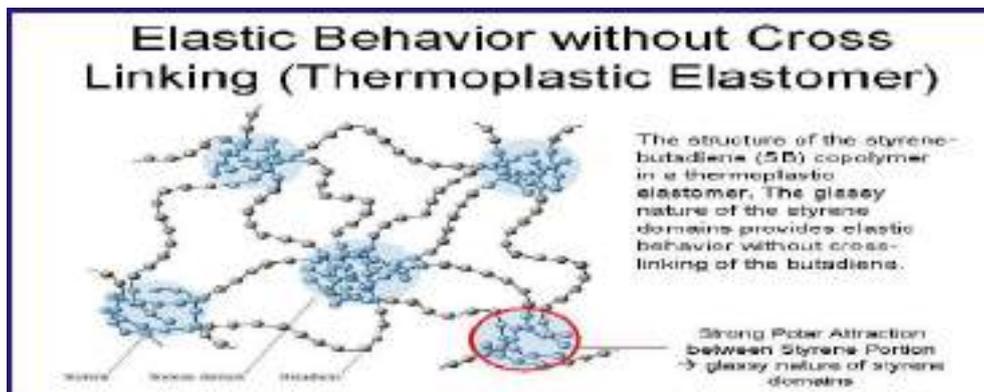
Gambar 4.44. Perilaku Elastis Karet Alam yang Belum dan Telah divulkanisasi

Seperti halnya thermoplastik perilaku elastomer berbeda pula dengan kenaikan temperatur. Transisi sifat mekanik terjadi terutama pada temperatur transisi gelas,  $T_g$  di mana ikatan sekunder mulai melebur. Pada Gambar 4.45 tampak perbedaan struktur elastomer di bawah dan di atas temperatur transisi gelas-nya. Di bawah  $T_g$ , di samping kaitan-kaitan silang (cross link), terdapat pula ikatan-ikatan sekunder yang Van der Waals yang menyebabkan kelompok-kelompok rantai molekul semakin rapat.

Di samping mekanisme elastisitas dengan kaitan silang sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, perilaku elastis dapat pula terjadi tanpa mekanisme ini. Fenomena ini misalnya terjadi pada ko polimer Styrene-Butadiene (SB) polimer yang dikenal pula sebagai Elastomer Thermoplastik. Elastisitas terutama disebabkan karena adanya tarik menarik polar yang kuat dari domain styrene yang bersifat gelas sebagaimana diilustrasikan dalam gambar.



Gambar 4.45 Struktur Rantai Molekul Karet di Bawah dan di Atas Temperatur transisi Gelas.



Gambar 4.46 Perilaku Elastis tanpa Kaitan Silang pada Elastomer Thermoplastik

#### 4.17. Polimer Thermoset

Polimer Thermoset memiliki perilaku sebagaimana logam getas, gelas, atau keramik sebagai akibat dari struktur rantai molekulnya yang kaku dengan ikatan kovalen membentuk jejaring 3 dimensi. Pada saat polimerisasi jejaring terbentuk lengkap dan terbentuk kaitan silang tiga dimensi secara permanen. Proses pembentukan tidak bersifat irreversible. Tidak seperti halnya polimer thermoplastik, thermoset tidak memiliki Tg (temperatur transisi gelas yang jelas). Kekuatan dan kekerasan dari thermoset pun tidak banyak dipengaruhi oleh kenaikan temperatur dan laju deformasi.

Bahan – bahan yang dipadatkan

Yang termasuk bahan – bahan yang dipadatkan adalah :

- Damar
- Bitumen
- Kompon
- Lilin dan paraffin
- dan lain – lain

##### 4.17.1. Damar

Damar termasuk zat organis yang tidak berbentuk seperti gelas dan kadang – kadang dalam keadaan meencair.

Ada 2 macam damar yang dikenal :

- Damar alam, meliputi :  
Sirlak dihasilkan dari kotoran kutu pohon tertentu

- damar dari getah pohon dammar
- kopal, damar tambang (fosil)
- Damar sintetis
- Damar nitroselulose (piroksilin)
- Damar fenol

Damar mempunyai 2 macam sifat , yaitu :

- Thermo plastic, artinya tidak ada perubahan yang berarti waktu dipanaskan sehingga mecair kemudian didinginkan menjadi padat.
- Thermo set, bahan akan mengalami banyak perubahan jika kena panas yang cukup tinggi dalam waktu yang cukup lama.

#### 4.17.2. Bitumen

Bitumen didapatkan dari pemurnian minyak bumi.

#### 4.17.3 Kompon

Kompon merupakan bahan yang digunakan untuk pekerjaan mengisi dan memadatkan peralatan listrik. Kompon yang sebelum digunakan adalah merupakan benda padat agar dapat dipukai, maka bahan ini perlu dipanaskan terlebih dahulu sehingga mencair. Dan setelah didinginkan ia akan kembali lg menjadi padat. Setelah padat bahan ini tetap menjadi bahan perekat.

Macam – macam kompon yang dikenal :

1. Kompon bitumen
2. Kompon kwarsa
3. Kompon kabel

Dalam mengerjakan kabel tanah, khususnya dalam penyambungan maka haruslah dicegah jangan sampai ada air yang masuk kedalam isolasi kabel. Sebab hal ini akan mengakibatkan terjadinya penembusan arus dalam bahan isolasi tersebut. Setelah beberapa lama tegangan listrik dimaskkan.

Untuk itu perlu sekali garniture kabel, seperti sarung persimpangan dan las, setelah dipasang dituang dengan bahan kompon (masa pengisi – volume massa). Masa pengisi merupakan bahan campuran antara bahan – bahan bitumenus dan terutama mengandung aspal.

Syarat – syarat penggunaan masa pengisi :

1. Masa pengisi dicairkan terlebih dahulu dalam pot-massa.
2. Bahan baker untuk mencairkan masa pengisi yang boleh dipakai hanya kayu arang atau turf. Tidak boleh menggunakan panas yang tinggi dari batu arang atau kokes, sebab dapat mengurangi daya sekatnya atau akan menyebabkan sarung timbel dari kabel tanah menjadi cair.

#### 4.17.4.Lilin dan paraffin

Lilin dan paraffin jarang sekali dipakai sebagai bahan penyekat.

### 4.18. Klasifikasi bahan penyekat listrik

Ada 2 macam klasifikasi bahan penyekat listrik :

1. Menurut standart AIEE
2. Menurut standart yang lain.

#### 4.18.1 Klasifikasi menurut standart AIEE

Menurut AIEE (American Institut of Electrical Engineering) bahan penyekat dapat diklasifikasikan seperti tabel 4.8 berikut.

Tabel 4.8 Klasifikasi bahan penyekat

Kelas	Bahan Isolsi	Batas suhu	Kenaikan suhu
O	Katun, sutra dan bahan organic lainnya yang tidak dapat ditekan atau direndam dalam cairan dilektrik	90 °C	50 °C
A	3. Katun, sutra kertas dan bahan organic lainnya yang dapat ditekan serta direndam dalam cairan dielektrik. 4. Bahan – bahan yang dicampur /dilapisi dengan Cellulose atau semacamnya. 5. Pernis (enamel) yang dipkai untuk kawat penghantar.	105 °C	65 °C

B	Mika, Asbes, Gelas, fibred an beberapa bahan organic lainnya.	130 °C	90 °C
H	6. Mika, Asbes, gelas, fibre dan beberapa bahan organic lainnya yang dibentuk dengan bahan – bahan isolasi 7. Bahan perekat yang dicampur Silikon atau semacamnya. 8. Persenyawaan silicon dalam bentuk karet	180 °C	140 °C
C	Mika, Porselin, Gelas, dan bahan – bahan organic lainnya.	180 °C	Tidak ditentukan

#### 4.18.2 Standard yang lain

Selain standard dari AIEE, ada juga standard lain yang dipakai dalam klasifikasi bahan penyekat, seperti yang diberikan pada tabel berikut :

Tabel 4.9 Klasifikasi bahan penyekat

Kelas	Temperatur maksimum
Y	90 °C
A	105 °C
E	120 °C
B	130 °C
F	155 °C
H	180 °C
C	180 °C (diatasnya)

##### 4.18.2.1 Bahan isolasi kelas Y

Adalah merupakan bahan berserat organic (Kertas, Karbon, Katun, Sutera dan sebagainya) yang tidak dicelup dalam bahan Pernis atau bahan pencelup lainnya. Juga termasuk disini bahan thermo plastic yang dapat menjadi lunak pada suhu yang rendah.

##### 6.3.2.2 Bahan isolasi kelas A

Bahan berserat dari kelas Y yang telah dicelup dalam Pernis atau kompon yang terbenam dalam cairan dielektrikum (misalnya penyekat : fibre yang dipakai dalam transformator yang terendam dalam minyak).

Bahan – bahan ini adalah Katun, Sutera dan kertas yang telah dicelup, termasuk juga kawat – kawat Enamel yang berlapis sebangsa Damar.

##### 4.18.2.2 Bahan isolasi kelas E

Penyekat kawat Enamel yang memakai bahan pegikat Polyvinyformal, Polyurethane dan Damar Epoxy dan bahan pengikat lain semacam ini dengan bahan pengisi Celulose, Pertinaks dan Tekstolit, film Triacetate, film dan serat Poly Ethylene tereptithalate.

##### 4.18.2.3 Bahan isolasi kelas B

Bahan bukan organic (Mika, Gelas, Fibre, Asbes) dicelup atau direkat menjadi satu dengan Pernis atau Kompon biasanya tahan panas (dengan Damar minyak pengering, Bitumen, Sirlak, Bakelit dan lain – lainnya).

##### 4.18.2.4. Bahan isolasi kelas F

Bahan bukan organic dicelup atau direkat menjadi satu dengan Eposide, Polyurethane lain yang tahan panas tinggi.

##### 4.18.2.5. Bahan isolasi kelas H

Semua bahan komposisi dengan bahan dasar Mika, Asbes dan Gelas Fibre dicelup dalam Silikon dan tidak mengandung sesuatu bahan organic (Kertas, Katun, dan sebagainya). Dalam kelas ini termasuk juga karet Silikon.

##### 4.18.2.6. Bahan isolasi kelas C

Bahan bukan organic yang tidak dicelup dan tidak terikat dengan zat – zat organic, misalnya : Mika, Mikanit yang tahan panas (menggunakan bahan pengikat bukan orgaik), Mikalek, Gelas dan bahan Keramik.

Hanya satu bahan organic saja yang termasuk kelas C yaitu : Polytetra Fluoroethylene (Teflon).

Latihan soal.

1. Apa yang dimaksud dengan bahan penyekat
2. Jelaskan proses bahan penyekat dengan menggunakan diagram pita energi
3. Apa saja yang menjadi sifat utama bahan penyekat, jelaskan satu persatu
4. Apa yang dimaksud dengan kerugian dielektrik dan kekuatan dielektrik pada bahan
5. Berdasar kekuatan dielektrik dan rugi-rugi dielektrik stabilitas kimia, dan korosi, isolator gas dapat dibagi menjadi berapa, jelaskan satu persatu
6. Jelaskan dan sebutkan sifat dan keunggulan dan kelemahan dari gas SF<sub>6</sub>
7. Sebutkan beberapa macam bahan isolasi cair serta penggunaannya
8. Sebutkan dan jelaskan sifat-sifat penting yang harus dimiliki oleh bahan isolator minyak
9. Jelaskan bagaimana proses terjadinya breakdown voltage pada bahan isolasi
10. Bagaimana pengaruh temperatur terhadap nilai tahanan
11. Sebutkan kelebihan bahan polimer sebagai isolator
12. Sebutkan jenis bahan isolasi berdasar standar AIEE



## BAB V

### BAHAN – BAHAN MAGNETIK

Tujuan Instruksional : Mahasiswa dapat memahami dan mengerti tentang defenisi bahan magnet seperti magnet buatan serta magnet alami, bahan magnet seperti ferromagnetik, Diamagnetik dan paramagnetik, karakteristik bahan magnetik, sifat bahan magnet, teori magnet yang meliputi teori weiss, teori webber, bahan inti magnet yang meliputi bahan silikon, bahan nikel, bahan inti ferit dan garnet, bahan inti magnet besi keras dan lunak. Energi dan Daya-Daya pada Inti Magnet, rugi-rugi pada bahan magnet yang meliputi rugi hysteresis dan rugi arus pusar (rugi arus eddy dan rugi besi), hukum ohm pada rangkaian magnet.

#### 5.1 Definisi magnet

Magnet adalah suatu benda /bahan yang dapat menarik besi, baja atau benda – benda magnet lainnya. Benda /bahan magnet ada 2 macam yaitu magnet alam dan magnet buatan. Inti magnet yang dimaksud di sini adalah bahan inti yang berfungsi untuk menyalurkan atau tempat mengalirnya garis gaya magnet. Bahan inti magnet yang baik harus dapat menampung sebanyak-banyaknya garis gaya magnet tanpa menimbulkan kerugian yang berlebihan seperti rugi panas yang ditimbulkan oleh histerisis atau magnet sisa dan arus pusar (*eddy current*) yaitu arus yang mengalir di dalam inti. Pada bab berikut ini akan dibahas bahan inti magnet beserta persamaan-persamaan yang terkait.

##### 5.1.1 Magnet alam

Magnet alam terdapat didalam tanah yang berupa biji besi magnet dalam bentuk besi oksida ( $Fe_3O_4$ ). Bahan magnet ditemukan pertama kali di magnesia, penggunaannya dalam praktek pertama – tama dipergunakan oleh bangsa Cina pada tahun 2637 sebelum Masehi berupa kompas kutub.

Penemuan selanjutnya adalah dari Bangsa Eropa antara lain ;

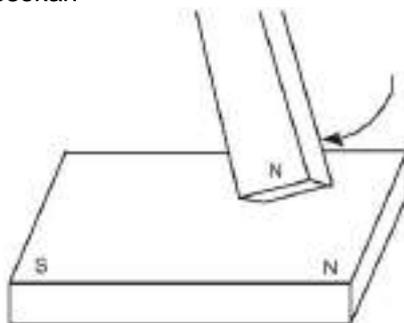
- Sarjana Inggris Dr. William Gilbert tahun 1540 – 1603
- Sarjana Denmark Hans Christian Dersted tahun 1771 – 1851
- Sarjana Jerman Karl Federick Gause tahun 1777 – 1855
- Sarjana Scotlandia James Clerk Maxwell tahun 1831 – 1879

##### 5.1.2 Magnet buatan

Magnet buatan (magnet artificial) dapat dibuat dari baja, besi, atau dari bahan – bahan ferromagnetis lainnya, seperti bahan paduan baja dengan nikel, aluminium-nikel dan kobalt (alnico).

Cara membuat magnet buatan :

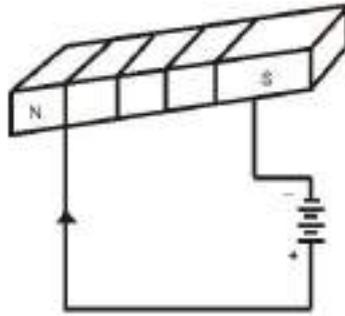
###### 5.1.2.1 Dengan gosokan



Gambar 5.1  
Pembuatan magnet dengan gosokan

Cara membuat magnet semacam ini adalah dengan menggosok gosokkan magnet pada batang baja atau batang bahan magnet lainnya yang akan dibuat magnet. Dalam hal ini, cara menggosok – gosokkan haruslah dikerjakan dalam arah yang selalu sama artinya menggosokkannya tidak boleh bolak – balik (lihat gambar). Sebetulnya cara ini tidak banyak dikerjakan terkecuali hanya untuk percobaan – percobaan ilmu alam.

### 5.1.2.2 Menggunakan arus listrik



Gambar 5.2  
Pembuatan magnet dengan arus listrik

Dalam pembuatan magnet dengan cara ini, arus listrik searah (dc) dialirkan kedalam kawat berisolasi dan kawat ini dililitkan sekitar / pada batang baja atau bahan ferromagnetis lainnya yang akan dibuat magnet.

Kuat kutub magnet buatan semacam ini tergantung dari pada kuat arus yang mengalir dalam lilitan kawat sekeliling batang tersebut.

Magnet buatan ada 2 macam :

- Magnet tetap (permanent)
- Magnet sementara.

Magnet tetap dibuat dari baja yang dikeraskan atau baja cukup keras kemudian dibuatkan sifat magnetis seperti cara diatas.

Magnet sementara dibuat dari besi lunak, baja lunak, atau bahan nikel dengan jalan yang sama seperti tersebut diatas.

### 5.1.3 Bahan Inti Magnet

Bahan yang dapat menarik logam disebut magnet dan bahan tersebut digunakan secara luas sebagai inti magnet pada peralatan-peralatan listrik dalam bidang industri, rumah tangga, mainan dan lain-lain. Berdasarkan kuat dan lemahnya daya tarik magnet, bahan tersebut dibedakan menjadi 3 (tiga) yaitu :

- a. Feromagnetis
- b. Paramagnetis
- c. Diamagnetis

Untuk ukuran yang sama besar, bahan feromagnetis mempunyai daya tarik yang paling besar, kemudian paramagnetis dan yang paling lemah adalah diamagnetis. Kekuatan menarik dari bahan magnet sangat dipengaruhi oleh banyaknya garis gaya yang mengalir di dalam inti magnet tersebut. Sedangkan kemampuan menampung garis gaya atau fluks magnet tergantung dari sifat bahan tersebut, dinyatakan dalam permeabilitas relatif  $\mu_r$ . Semakin lunak bahan inti magnet akan semakin banyak dapat dilalui garis gaya atau menampung fluks magnet serta mempunyai  $\mu_r$  yang semakin besar sehingga mempunyai momen magnetik yang besar. Jadi bahan feromagnetik adalah bahan yang paling lunak dan mempunyai  $\mu_r$  yang paling besar, kemudian diikuti oleh bahan paramagnetis dan bahan diamagnetis dengan  $\mu_r$  yang paling kecil. Dalam hal ini secara umum sering dikatakan bahwa yang dimaksud dengan bahan magnet adalah bahan yang bersifat feromagnetis atau ferimagnetis, yaitu sifat dapat menarik besi dengan kuat. Sedangkan bahan yang bersifat paramagnetis dan diamagnetis kadang-kadang dikatakan sebagai bahan yang tidak magnetik karena mempunyai gaya tarik kemagnetan yang lemah.

Bahan yang sering dipakai pada teknik listrik sebagai bahan inti magnet kebanyakan adalah besi lunak. Bahan tersebut merupakan paduan dari besi dan campuran lainnya yang umumnya disebut baja. Besi murni secara teoritis adalah ferrous atau Fe murni dengan kadar karbon (C) nol persen (0%). Permeabilitas relatifnya tinggi dan rugi histerisisnya kecil namun jarang terdapat di pasaran. Walaupun ada harganya sangat mahal sehingga hanya dipakai untuk keperluan-keperluan tertentu. Secara praktis, besi seperti pada pengertian umum yang ada di pasaran sesungguhnya adalah *stainless steel* (SS), *cast steel* (baja tuang) dan *cast iron* (besi tuang), yang membedakan dari ketiganya adalah kadar karbonnya.

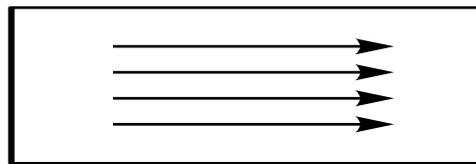
## 5.2 Bahan – bahan magnet

Logam untuk bahan – bahan magnet mempunyai sifat yang berbeda – beda, ada mudah sekali dipengaruhi oleh magnet dan dapat dibuat magnet dengan mudah dan ada yang sulit dipengaruhi oleh magnet.

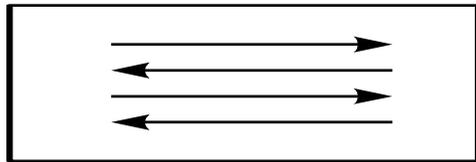
Menurut sifat – sifat bahan terhadap pengaruh magnet, dapatlah bahan – bahan itu digolongkan menjadi 4 (empat) bagian sebagai berikut :

### 5.2.1 Bahan Ferromagnetik

- Bahan Ferromagnetik adalah bahan yang dapat mengalirkan garis gaya magnet dengan baik.
- Bahan Ferromagnetik mempunyai magnetic Permeability  $\mu \gg 1$
- Banyak dipergunakan karena merupakan bahan magnetic yang mempunyai sifat mudah dimagnetisasi.



Ferro magnetik



Ferri magnetik

Bahan Ferromagnetik adalah bahan dimana polarisasi magnetic terjadi dengan sendirinya pada keadaan “sub lattice/sisi – sisi yang sama. Polarisasi pada sebuah “sublattice” menjadikan atom – atom bahan searah atau parallel secara keseluruhannya. Bahan yang mempunyai sifat magnet permanent dipolenya berinteraksi sedemikian rupa sehingga searah atau parallel. Bahan yang demikian disebut bahan Ferromagnetik.

Apabila dipole – pole yang berdekatan cenderung untuk parallel tetapi tak searah atau berlawanan arahnya (anti parallel), bahan tersebut dinamakan bahan “anti Ferromagnetik atau bahan “ferrimagnetik”.

Bahan Ferromagnetik terbagi atas 2 macam yaitu :

- Bahan magnet keras atau magnet permanent
- Bahan magnet lemah atau soft magnetic.

Bahan Ferromagnetik dibagi atas 4 macam :

- Soft ferrite
- Hard ferrite
- Square loop ferrite
- Microwave ferrite.

Bahan – bahan Ferromagnetik dalam perdagangan:

1. Besi murni dengan kadar 99,83 % Fe.

Sifat :

- Kejenuhan sangat tinggi.
- Mempunyai lengkung hysteresis yang baik.

Penggunaannya :

- Untuk kutub – kutub dari mesin – mesin arus searah.
- Untuk rele jatuh lambat.

2. Baja yang mempunyai karbon rendah

- Permeability tinggi.
- Kerugian hysteresis rendah apabila dibandingkan dengan besi dan baja tuang.

Penggunaannya :

- Untuk selenoida arus searah
- Rem magnet

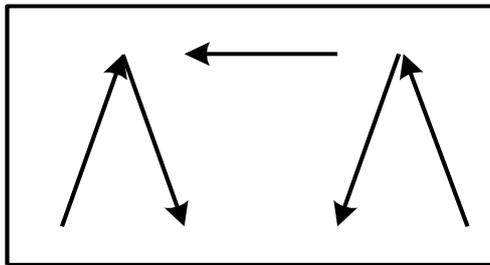
- Kopling magnet pada traksi listrik.
- 3. Baja tuang
  - Kerugian Hysterisis besar
 Penggunaannya :
  - Untuk perumahan mesin
- 4. Baja silikon (dalam bentuk "electrical sheet")
  - Mempunyai resistivity cukup besar, karena dalam bentuk lembaran maka kerugian besi yang berupa kerugian hysteresis dan arus Eddy akan menjadi kecil.

Penggunaannya :

- Bahan inti transformator
- Bahan jangkar mesin – mesin listrik.

### 5.2.2 Bahan Paramagnetik

- Bahan Paramagnetik adalah bahan yang dapat mengalirkan garis – garis gaya magnet tetapi tidak banyak.
- Mempunyai magnetic permeability " $\mu$ " sedikit lebih besar dari 1. contoh : Al, Pb, Mn, Cr.
- Bahan yang atom – atomnya mempunyai banyak permanent magnetic dipole, tetapi mempunyai susunan seperti gambar disamping disebut bahan Paramagnetik, Interaksi antara dipole yang berdekatan dapat diabaikan



Penggunaan bahan Paramagnetik :

- Untuk memperkecil pemanasan sebagai akibat adanya kerugian arus pusar/eddy.
- Untuk memperkecil pengaruh/menutupi alat – alat yang tidak boleh terkena gelombang elektro magnetik, misalnya sebagai "shielding" (perisai) pada alat – alat elektronik.

### 5.2.3 Bahan diamagnetik

- Bahan diamagnetik adalah bahan yang sukar menyalurkan garis – garis gaya magnet.
- Mempunyai "magnetic permeability"  $\mu$  sedikit lebih kecil dari 1.
- Bahan diamagnetik merupakan bahan yang tidak mempunyai permanent magnetic dipole.
- Contoh : Bi (Bismuth)

Penggunaannya ;

- Sebagai alat untuk pengukuran fluks magnet.

### 5.2.4 Bahan non-magnetik

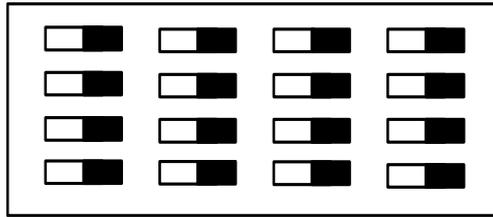
Bahan non magnetic adalah bahan yang tidak dapat dipengaruhi oleh magnet dan tidak dapat dibuat menjadi magnet. Contoh gelas, kertas, kayu, K-monel, nomag. Karena bahan diamagnetik sukar dipengaruhi oleh magnet, maka sering kali bahan diamagnetik dimasukkan dalam golongan bahan non-magnetik.

## 5.3 Teori magnet

### 5.3.1 Menurut teori weber

Semua benda terdiri atas molekul – molekul, dan molekul – molekul ini merupakan bahan magnetik yang sangat kecil yang disebut "magnet elementer".

Untuk benda – benda yang bukan magnet, letak magnet – magnet elementer ini tidak menentu (tidak teratur), sehingga mereka saling menetralkan yang mengakibatkan benda tidak lagi mempunyai gaya tarik atau gaya tolak yang berarti. Pada batang magnet letak magnet – magnet elementer adalah teratur dan mengarah satu jurusan sehingga satu sama lainnya saling memperkuat.



Hal ini mengakibatkan batang magnet mempunyai gaya tarik/gaya tolak pada kutub – kutubnya (ujung – ujungnya) yang cukup kuat.

### 5.3.2 Menurut Weiss

Weiss merupakan teori magnet dengan menggunakan teori elektron. Menurut teori Weiss, tiap – tiap atom benda terdiri dari inti dan elektron – elektron yang beredar mengelilingi intinya menurut garis lintasan edarnya (orbitnya). Selain elektron – elektron ini berputar mengelilingi inti menurut garis edarnya, juga berputar sekeliling sumbunya masing – masing. Pada sumbu – sumbu elektron terdapat kutub – kutub magnet elementer, yaitu kutub utara dan kutub selatan. Perputaran elektron – elektron menurut sumbunya ini ada yang positif dan ada yang negatif, artinya arah perputaran itu ada yang searah dengan jarum jam dan adapula yang berlawanan arah. Selanjutnya perputaran elektron menurut sumbunya disebut puntiran elektron. Untuk puntiran – puntiran elektron yang tidak searah, letak poros – poros elektron tidak teratur, sehingga kutub – kutub magnet elementer pada poros elektron saling memperlemah (menetralkan) satu dengan lainnya. Didalam atom itu sendiri terdapat kelompok – kelompok elektron yang mempunyai puntiran elektron searah, akan tetapi pada orbit sebelah luar juga sering terdapat elektron – elektron bebas yang meloncat kian kemari, sehingga diluar tidak terasa adanya magnet.

Kelompok – kelompok elektron yang mempunyai puntiran searah disebut “kompleks weiss”, dan ini akan merupakan magnet – magnet kecil yang agak kuat dalam atom – atom benda.

Bahan – bahan Ferromagnetik mudah dipengaruhi oleh magnet dan mempunyai sifat arah puntiran elektron – elektronnya mudah disearahkan. Sifat yang sedemikian inilah yang menyebabkan bahan Ferromagnetik mudah dipengaruhi oleh magnet luar. Di antara bahan – bahan yang sudah dijadikan magnet ada yang mudah kembali seperti semula dan ada pula tidak dapat kembali atau hamper tidak dapat kembali seperti semula. Kekuatan untuk menyearahkan puntiran elektron seperti semula disebut gaya kuersitif (coercive force).

Gaya kuersitif (coercive force) besi lunak dan plat – plat dynamo lebih besar daripada baja atau logam campuran seperti baja-kobalt dan sebagainya. Hal ini berarti pula bahwa gaya tolak – menolak atau tarik – menarik kutub – kutub elektron besi dan plat dynamo yang lebih besar

## 5.4 Bahan Inti Magnet Besi Lunak

Seperti telah dijelaskan bahwa inti magnet lunak mempunyai  $\mu_r$  yang besar. Besarnya  $\mu_r$  tersebut sangat bervariasi dari 500 sampai dengan  $10^6$ , tergantung dari paduan atau campurannya. Namun untuk mesin listrik-listrik biasanya dipakai besi lunak dengan  $\mu_r$  antara 2000 sampai dengan 6000.

Dengan  $\mu_r$  yang besar tersebut maka rugi histerisis  $P_h$  dan arus pusar  $P_e$  dari inti menjadi kecil, sehingga inti magnet dan mesin tidak mengalami panas yang berlebihan. Bahan inti magnet lunak yang paling terkenal adalah besi-silikon (Fe-Si) dan besi nikel (Fe-Ni).

### a. Besi Silikon

Bahan inti magnet dari besi karbon sudah banyak digantikan oleh besi silikon karena dapat mengurangi rugi-rugi magnet yaitu  $P_h$  dan  $P_e$  sampai sepertiganya. Jadi dengan paduan Fe-Si akan diperoleh  $P_h$  dan  $P_e$  kecil. Pembuatan Fe-Si dilakukan dengan cara pencairan untuk menghilangkan unsur-unsur S, P, N, C & O. Kemudian dengan perlakuan panas, sisa karbon (C) dan oksigen (O) dihilangkan dengan menambahkan hidrogen (H). Dengan proses tersebut permeabilitas bahan akan menjadi besar dan besi menjadi lunak. Persentase Si kira-kira 3 sampai 7%. Semakin besar unsur Si-nya, sifat magnetnya akan bertambah baik tetapi dalam bentuk plat lebih sukar di-rol atau digulung. Untuk inti besi pada transformator, motor dan generator sering digunakan besi lunak paduan Fe-Si dengan Si 4%.

## b. Besi Nikel (Fe-Ni)

Besi nikel merupakan bahan besi lunak yang sesuai dan banyak dipakai di dalam sistem komunikasi karena mempunyai permeabilitas yang besar. Di samping itu penggunaan bahan Fe-Si untuk peralatan komunikasi pada tingkat daya rendah dan daerah frekuensi yang dapat didengar serta frekuensi rendah tidak sesuai. Dalam hal ini sering dipakai inti dari besi lunak paduan Fe-Ni yang kadar Ni-nya kira-kira 50 sampai 80%. Paduan Fe-Ni dilakukan pada fasa cair dengan suhu 400-600°C dan dengan proses pendinginan cepat, akan diperoleh permeabilitas yang besar. Sebaliknya apabila proses pendinginannya lebih lambat akan diperoleh permeabilitas yang lebih kecil, sehingga dengan pendinginan yang lebih cepat akan semakin baik. Perbandingan besarnya  $\mu_r$  (awal),  $P_h$  dan B jenuh dari besi lunak ditunjukkan pada Tabel 5.1.

**Tabel 5.1 Perbandingan  $\mu_r$  (awal),  $P_h$  dan B jenuh dari besi lunak**

No.	Bahan	$\mu_r$	$P_h$ (joule/m <sup>3</sup> )	B <sub>j</sub> (weber/m <sup>2</sup> )
1.	Besi perdagangan	250	500	2,16
2.	Fe-4% Si	500	50-150	1,95
3.	Fe-3% Si	15.10 <sup>3</sup>	35-140	2,0
4.	Peralloy : 55% Fe, 45%Ni	2.700	120	1,6
5.	Mumetal : 18% Fe, 2% Cr, 5%Cu & 75% Ni	30.10 <sup>3</sup>	20	0,8
6.	Paduan super (supermalloy) (79% Ni, 15% Fe, 5% Mo, 1% Mn)	10 <sup>5</sup>	2	0,79

Keterangan :  $\mu_r$  sebelum diolah, B<sub>j</sub> rapat fluks jenuh

### 5.4.1 Bahan Inti Magnet Ferit dan Garnet

Bahan inti magnet pasti mempunyai rugi panas berupa rugi histerisis dan rugi-rugi pusar. Besarnya rugi-rugi tersebut juga sangat bergantung pada frekuensi kerjanya. Semakin tinggi frekuensinya rugi-rugi tersebut juga semakin tinggi. Untuk itu bahan inti magnet yang dipakai untuk frekuensi tinggi seperti trafo TV dan penerima FM adalah Ferit dan Garnet. Bahan paduan ferit terbuat dari 50% MgO, 50% MnO ditambah Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Sedangkan bahan paduan garnet adalah ferit dengan ditambah unsur logam tanah jarang seperti samarium (Sm), europium atau emas (Eu) dan gadolonium (Gd). Untuk frekuensi audio sering digunakan inti dari bahan ferit, sedang untuk frekuensi yang lebih tinggi misalnya gelombang mikro dipakai inti dari bahan garnet.

### 5.4.2 Bahan Inti Magnet Besi Keras

Besi keras mempunyai kejenuhan magnet yang besar, sering dipakai untuk inti magnet permanen dan magnet tetap. Contoh pemakaian besi keras sebagai magnet permanen yang terkenal adalah pada kompas yang berfungsi sebagai penunjuk arah dan telah dipakai oleh para pelaut China pada abad kedua. Di samping itu magnet permanen juga banyak dipakai pada mesin listrik kecil, alat ukur listrik relai dan sebagainya. Magnet permanen biasanya dibuat dari baja atau besi sehingga mempunyai magnet sisa dalam waktu yang lama tanpa memerlukan sumber energi dari luar. Magnet permanen yang dibuat dari baja karbon tersebut mempunyai sifat yang masih kurang baik dimana sifat kemagnetannya tidak begitu lama lebih-lebih kalau mengalami getaran dan tumbukan. Untuk memperbaiki sifat tersebut kemudian dibuat bahan magnet permanen dengan komposisi paduan 14% Ni, 24% Co, 8% Al dan 3% sisanya adalah Fe. Beberapa bidang pemakaian besi lunak dan besi keras ditunjukkan pada Tabel 5.2 dan Tabel 5.3.

**Tabel 5.2 Pemakaian besi lunak**

No	Pemakaian	Nama Bahan/komposisi	Catatan
1.	Frekuensi tinggi/menengah a. Gelombang radio	ferit Ni-Zn & Cu- Zn-Mg	$\mu_r$ tinggi, $P_h$ dan $P_e$ kecil

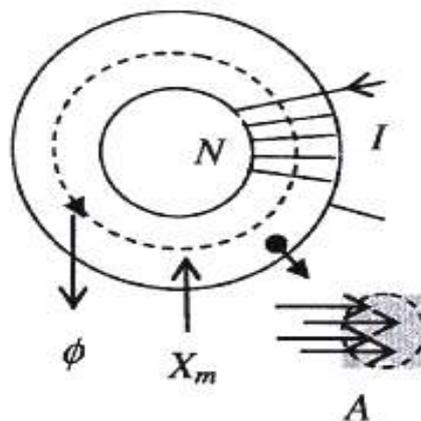
	b. Telekomunikasi c. Pesawat TV	ferit Mn-Zn ferit Mn-Zn	
2.	Memori magnetik Komputer	ferit Mn-Zn	Grafik histerisis persegi
3.	Gelombang mikro (penyerap gelombang Radio, isolator, sirkulator	ferit Mn-Zn	
4.	Magnetostriksi supersonik	ferit Mn-Zn	
5.	Kepala magnetik	ferit Mn-Zn	
6.	Sensor suhu	ferit Mn-Zn	
7.	Pemercepat partikel	ferit Mn-Zn	Frekuensi dan daya tinggi

**Tabel 5.3 Pemakaian besi keras**

No.	Pemakaian	Nama Bahan/komposisi	Catatan
1.	Corong suara, fone kepala, alat akustik	BaO-6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dan SrO <sub>6</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , i	Gaya koersif dan remanensi magnet (magnet sisa) tinggi
2.	Magnetron, penuntun gelombang mikro		
3.	Alat ukur (amper dan volt meter)		
4.	Motor kecil/mikro motor		
5.	Penjepit magnet, magnet untuk mainan		

### 5.4.3 Grafik Magnetisasi dan Gaya kemagnetan

Bila sepotong inti besi yang tidak berujung dengan panjang  $X_m$  dan luas penampang  $A$  dililit kumparan sebanyak  $N$  buah, kemudian pada lilitan tersebut dialirkan arus  $I$ , maka induksi magnet  $B$  dan gaya kemagnetan  $H$  yang ditimbulkannya adalah sebagai berikut, lihat Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Inti magnet berbentuk toroidal dan kumparan

$$HX_m = NI$$

$$H = \frac{NI}{X_m}$$

$$B = \mu H = \mu \left( \frac{NI}{X_m} \right) \dots \dots \dots (5.1)$$

$$B = \frac{\phi}{A}$$

$$\phi = B \times A = A \left( \mu \frac{NI}{X_m} \right) \dots \dots \dots (5.2)$$

Dengan :  $\mu = \mu_o \mu_r$

$\mu_o$  : permeabilitas ruang hampa

$\mu_r$  : permeabilitas relatif, tergantung jenis bahan

H : gaya kemagnetan (*magnetizing force*)

B : induksi magnet

$X_m$  : panjang rata-rata inti yang dilalui garis gaya

Gaya kemagnetan *H*, sering juga disebut dengan kuat medan magnet, atau juga sering disebut dengan intensitas magnet. Sedangkan induksi magnet *B* sering disebut dengan rapat fluks magnet atau rapat garis gaya magnet. Besaran-besaran magnet tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk CGS dan MKS (SI) untuk satuan elektromagnetik (emu) sebagai berikut :

Satuan	<i>H</i>	<i>B</i>	$\phi$	$\mu_o$
CGS Emu	amper lilit/meter (AT/m)	weber/m <sup>2</sup> Wb/ m <sup>2</sup>	weber (Wb)	$4\pi \times 10^{-7}$
MKS Emu	Oersted (Oe)	gauss (Gs)	maxwell (Mx)	1

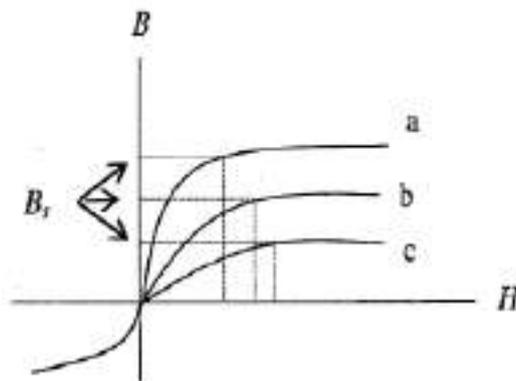
Keterangan :

*H* : 1 AT/m =  $4\pi \times 10^{-3}$  oersted (Oe)

*B* : 1 weber/m<sup>2</sup> (Wb/m<sup>2</sup>) = 1 Tesla =  $10^4$  gauss

$\phi$  : 1 Wb =  $10^8$  maxwell

Grafik antara induksi magnet *B* terhadap gaya kemagnetan *H* merupakan hal yang sangat penting di dalam ilmu keteknikan. Grafik tersebut diperoleh dengan menaikkan arus *I* pada Gambar 5.3, dimana Grafik yang diperoleh pada umumnya berbentuk seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.4 dan disebut sebagai grafik magnetisasi normal.

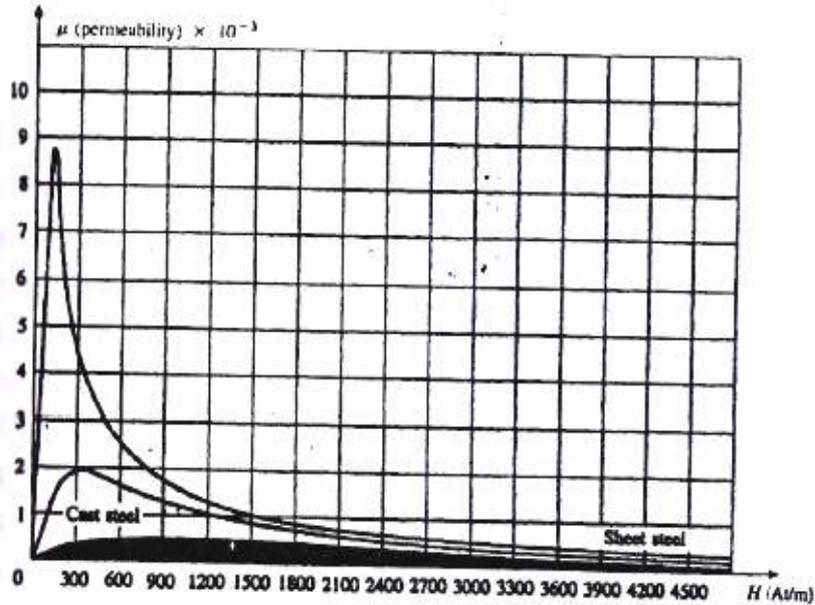


Gambar 5.4 Grafik magnetisasi normal

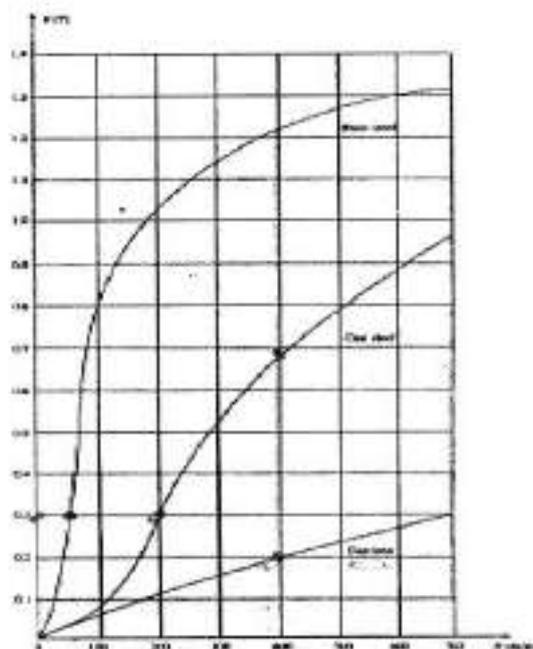
Dari persamaan 5.1 terlihat bahwa apabila arus *I* dinaikkan maka *H* dan *B* akan naik. Tetapi bila *I* terus dinaikkan sampai pada harga *H* tertentu, harga *B* tidak banyak lagi berubah. Kondisi ini dikatakan sebagai kondisi jenuh atau saturasi dimana inti tidak lagi mampu menampung fluks magnet dan rapat fluks magnet *B* juga menjadi jenuh (*B<sub>s</sub>*). Dalam kondisi tersebut, walaupun arus *I* dibesarkan dan *H* naik namun *B* akan tetap atau tidak bertambah besar.

Bahan yang mencapai kondisi jenuh untuk harga  $H$  yang lebih rendah, disebut magnet besi lunak dan mempunyai permeabilitas relatif yang lebih besar. Jadi grafik (a) pada Gambar 5.4 adalah grafik untuk bahan feromagnetis yang paling lunak dan sering disebut sebagai magnet lunak serta mempunyai permeabilitas yang paling besar. Sedangkan grafik (c) adalah sebaliknya, yaitu bahan feromagnetik yang paling keras dan sering disebut magnet keras serta mempunyai permeabilitas relatif yang lebih kecil.

Pada Gambar 5.5 ditunjukkan grafik permeabilitas relatif  $m_r$  sebagai fungsi kuat medan magnet  $H$  dari tiga macam bahan feromagnetik paduan besi dan logam lain yang umum dipakai sebagai bahan magnet, yaitu *sheet steel* (SS), *cast steel* (baja tuang) dan *cast iron* (besi tuang). Selanjutnya pada gambar 5.6 ditunjukkan grafik hubungan antara rapat fluks magnet  $B$  versus kuat medan magnet  $H$  dari tiga macam bahan tersebut untuk harga  $B$  rendah atau belum jenuh.



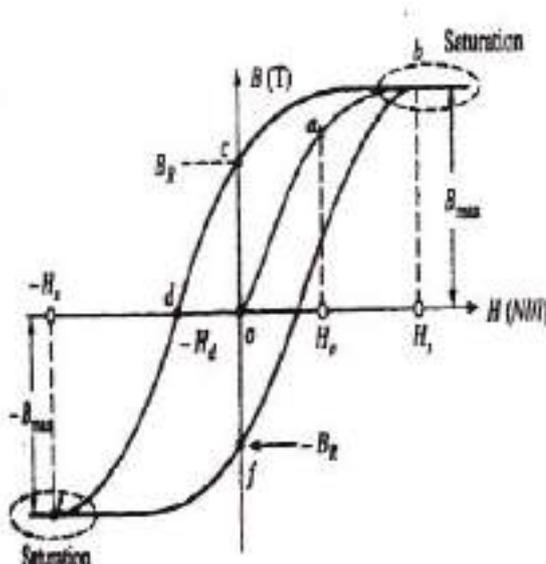
Gambar 5.5 Grafik  $m$ - $H$  dari bahan feromagnetik *sheet steel*, *cast steel* dan *cast iron*



Gambar 5.6 Grafik  $B$ - $H$  dari bahan feromagnetik *sheet steel*, *cast steel* dan *cast iron* pada  $H$  rendah atau  $B$  belum jenuh

Seperti telah dijelaskan bahwa bahan dengan permeabilitas lebih besar bersifat lebih lunak. Maka dengan melihat Gambar 5.6 dapat dipahami bahwa permeabilitas  $\mu = B/H$  yang paling besar berturut-turut adalah *sheet steel* kemudian *cast steel* dan yang terakhir adalah *cast iron*.

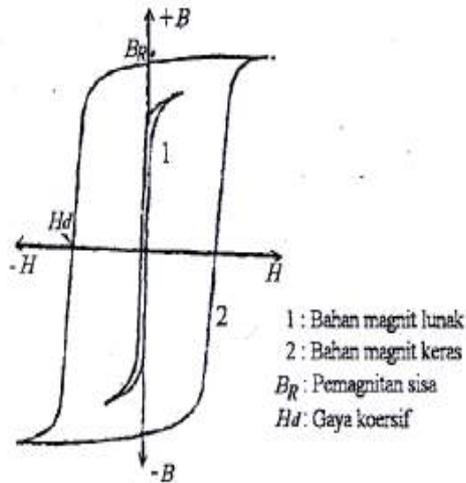
Grafik  $B$  sebagai fungsi  $H$  pada Gambar 5.4 dapat dibuat lebih lanjut dengan memperbesar harga  $H$ . Mula-mula  $H$  dinaikkan dengan menaikkan arus yang mengalir di dalam lilitan pada Gambar 5.3 sampai mencapai  $H_a$  pada titik  $a$ , lihat gambar 5.7.



Gambar 5.7 Grafik histerisis bahan feromagnetik

Bila arus tersebut kemudian terus dinaikkan maka  $H_a$  akan mencapai harga saturasi atau jenuh ( $H_s$ ) dan  $B$  mencapai harga maksimum ( $B_{max}$ ) di titik  $b$ . Namun bila kuat medan magnet diturunkan menuju nol dengan menurunkan arus di dalam lilitan, grafik tidak akan kembali mengikuti jalur semula tetapi akan mengikuti jalur  $b-c$ . Pada kondisi tersebut, dimana kuat medan magnet  $H$  berharga nol pada titik  $c$ , rapat fluks menjadi  $B_R$  yaitu merupakan rapat fluks magnet sisa. Hal ini mengakibatkan kebolehdjian dapat dibuatnya magnet permanen dari suatu bahan walaupun lilitan dan arus dilepaskan dari inti magnet. Selanjutnya apabila arus pada lilitan kemudian dibalik arahnya akan dihasilkan kuat medan magnet negatif, dan pada saat rapat fluks magnet mencapai harga nol maka kuat medannya menjadi  $-H_d$ , lihat titik  $d$  pada grafik garis  $c-d$ . Kuat medan magnet negatif ( $-H_d$ ) merupakan gaya yang diperlukan untuk memaksa rapat fluks sisa  $B_R$  menjadi nol sehingga sering disebut sebagai gaya koersif (*coercive force*) yang menjadi ukuran koersivitas suatu bahan magnet. Apabila arus terus diperbesar terus maka akan dicapai kondisi saturasi  $-H_e$  pada titik  $e$  dan kemudian kembali nol pada titik  $f$ , lihat grafik garis  $d-e-f$ . Akhirnya bila kemudian  $H$  diperbesar pada arah positif maka grafik akan mengikuti garis  $f-b$ . Grafik tertutup yang ditunjukkan oleh garis  $b-c-d-e-f-b$  selanjutnya dikenal dengan grafik atau lengkung histerisis bahan feromagnetik. Kata histerisis berasal dari bahasa Romawi *histerein* yang artinya tertinggal di belakang. Maksudnya disini adalah pada penggambaran grafik  $B-H$ , rapat fluks  $B$  tertinggal di belakang kuat medan magnet  $H$ .

Tergantung pada jenis lengkung histerisisnya, bahan feromagnetik dapat mempunyai gaya koersif yang besar dan kecil. Pada besi keras, gaya koersivitasnya tinggi sehingga lengkung histerisisnya besar atau gemuk. Artinya inti magnet dari bahan besi keras tidak mudah hilang kemagnetannya dan bahan seperti ini sangat baik untuk bahan magnet permanen. Sebaliknya untuk bahan inti magnet dari besi lunak mempunyai gaya koersif yang kecil, lengkung histerisis yang ramping, sifat kemagnetannya mudah hilang dan lebih sesuai dipakai untuk magnet buatan, lihat Gambar 5.8.



Gambar 5.8 Bentuk grafik histerisis untuk besi keras dan besi lunak

**5.4.4. Energi dan Daya-Daya pada Inti Magnet**

Energi listrik yang diberikan oleh sumber digunakan oleh inti dan belitannya untuk menghasilkan energi yang tersimpan di dalam inti berupa medan magnet. Bila arus sebagai fungsi waktu maka

$$i(t) = \frac{d\phi}{dt}$$

$$d\lambda = Nd\phi$$

$$B = \phi/A, \text{ atau } d\phi = A dB$$

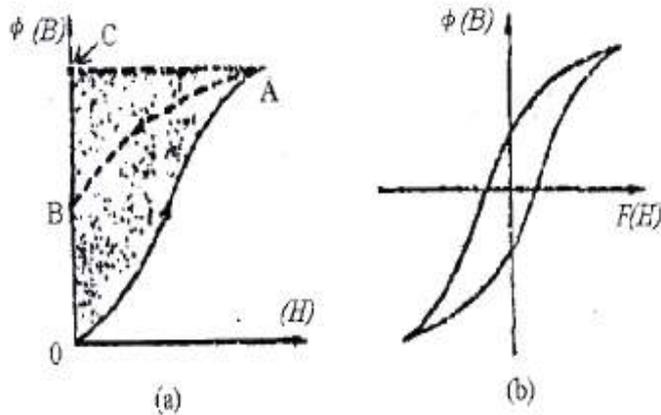
dan

$$W_f = \int id\lambda = \int iNd\phi = \int (HxX_m)(Ax dB)$$

$$= \int (AxX_m)(Hx dB) = \int VxHx dB$$

$$\frac{W_f}{Vol} \int Hx dB \dots\dots\dots (5.3)$$

Dari persamaan 5.3 dapat diketahui bahwa energi yang tersimpan di dalam inti magnet per-unit volume adalah luasan grafik yang dibatasi oleh B dan H, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.9.



Gambar 5.9 Energi dalam inti magnet (luasan antara B dan H)

Keterangan :

1. OAC, energi yang dibutuhkan untuk membuat magnet atau energi dalam inti magnet.
2. OAB, rugi histerisis.
3. ABC, energi yang dilepas saat magnet dikembalikan ke nol.
4.  $H_d$ , medan pengkutuban (*coersive field*).
5.  $B_R$ , rapat fluks sisa (*residual/remanen flux density*).
6. Bentuk grafik kurus atau gemuk, permeabilitas relatif  $\mu_r$  dan gaya koersif tergantung pada jenis bahan atau struktur atom dari bahan, lihat gambar 5.8.
7. Bahan besi yang lebih lunak mempunyai grafik yang lebih ramping,  $\mu_r$  dan  $B_m$  yang lebih besar, dan sebaliknya.
8. Pada grafik 5.8, grafik yang ramping merupakan grafik magnetisasi dari besi lunak dan banyak dipakai sebagai magnet buatan. Sedangkan grafik yang gemuk merupakan grafik magnetisasi dari besi keras sering dipakai untuk bahan magnet permanen atau magnet tetap.

Satuan dari energi magnet pada persamaan 5.3 adalah joule, dapat diturunkan dari tegangan induksi  $e_{ind}$  sebagai berikut :

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

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

Atau bila diintegrasikan terhadap  $t$  diperoleh  $\phi$ ,

$$\phi = \frac{e_{ind} \times t}{N}$$

$$dB = \frac{d\phi}{A}$$

$$H = (NI/X_m)$$

Dari persamaan diatas maka  $f$  dalam volt detik per lilit,  $B$  dalam volt detik per lilit per  $m^2$  dan  $H$  dalam lilit amper per meter, sehingga :

$$W_f = V(m^3) \times B.(V dt/lilit m^2) \times H(lilit A/m)$$

$$= V \times A \times dt \text{ (watt-detik atau joule)}$$

### Contoh soal 5.2

Sebatang besi lunak homogen berbentuk batang berukuran 10 cm x 5 cm x 4 cm mempunyai permeabilitas relatif 2500. Besi tersebut diberi lilitan dan dialiri arus sehingga menjadi magnet dengan rapat fluks  $B$  sebesar 400 tesla. Bila permeabilitas ruang hampa  $4\pi \times 10^{-7}$ , hitunglah energi yang terkandung dalam inti tersebut.

Penyelesaian :

$$\text{Volume inti } V = 10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} = 200 \text{ cm}^3 = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r = 4\pi \times 10^{-7} \times 2500 = 3,14 \times 10^{-3}$$

$$B = 400 \text{ T} = 400 \text{ Wb/m}^2$$

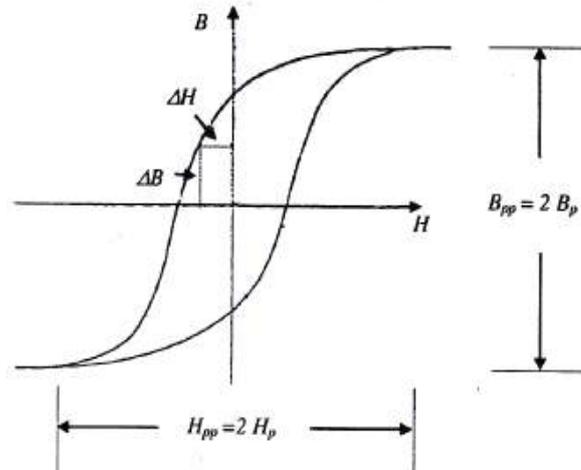
$$H = B/\mu = \frac{400}{3,14} \times 10^{-3} = 127,38 \text{ AT/m}$$

Energi dalam inti menurut persamaan 3.3 adalah :

$$W_f = V H.B = 2 \times 10^{-4} \times 127,38 \times 400 = 18,19 \text{ joule}$$

Seperti telah dijelaskan pada Gambar 3.8 bahwa di dalam inti besi magnet terdapat histerisis, dimana histerisis tersebut mengakibatkan inti besi menjadi panas dan hal ini merupakan suatu kerugian. Besarnya rugi histerisis  $P_h$  tersebut tergantung dari jenis bahan, volume dan harga maksimum dari induksi magnet  $B$ . Di samping rugi daya histerisis, di dalam inti juga terdapat rugi daya yang disebabkan oleh arus pusar  $P_e$ . Dengan melihat lengkung

histerisis pada Gambar 5.10, besarnya kedua rugi daya tersebut dapat dihitung sebagai berikut :



Gambar 5.10 Grafik loop histerisis normal bahan feromagnetik

$$P_h = k_h f B_{max}$$

$$P_{inti} = P_h + P_e = B_{max} (k_h f + k_e f^2)$$

$$P_h = F(f) \text{ dan } P_e = F(f) \dots \dots \dots (5.4)$$

$$B_{max} = \frac{\Phi_m}{A} = \frac{V_{rms}}{\pi f N A 10^{-3} \sqrt{2}} \dots \dots \dots (5.5)$$

$$P_h = \frac{B_{pp} H_{pp} A V f 10^{-8}}{0,4 \pi X_{pp} Y_{pp}} \dots \dots \dots (5.6)$$

$$P_e = \frac{1.22 37 A t (B_{pf} f)^2 10^{-7}}{\rho} \dots \dots \dots (5.7)$$

- dimana,  $P_h$  : rugi histerisis (watt)  
 $P_e$  : rugi arus putar (watt)  
 $V$  : volume inti (cm)  
 $f$  : frekuensi (Hz)  
 $X_{pp}$  dan  $H_{pp}$  (cm)  
 $Y_{pp} = B_{pp}$  (cm)  
 $t$  : tebal inti (cm)  
 $B_p = \frac{1}{2} B_{pp}$   
 $k_h$  dan  $k_e$ , konstanta

**Contoh Soal 5.3**

Pada suatu inti magnet yang mempunyai luas penampang 0,0916 cm<sup>2</sup> dan permeabilitas relatif 2000 dililitkan kumparan berjumlah 23. Bila pada ujung lilitan diberi tegangan 70 volt (rms) dengan frekuensi 100 kHz, hitunglah rapat fluks maksimum  $B_m$ , kuat medan magnet maksimum  $H_m$  dan fluks maksimum  $f_m$  yang terjadi dalam satuan emu CGS maupun MKS.

Penyelesaian :

Berdasarkan persamaan 3.5

$$B_{mak} = \frac{\phi_m}{A} = \frac{V_{rms}}{\pi f N A 10^{-8} \sqrt{2}}$$

Dengan memasukkan besaran-besaran yang diketahui dalam satuan emu CGS yaitu :

$$\mu_r = 2000$$

$$A = 0,0916 \text{ cm}^2$$

$$N = 23$$

$$V = 70 \text{ volt (rms)}$$

$$f = 100 \text{ kHz}$$

maka

$$B_{mak} = \frac{70}{(3,14) \cdot (100 \cdot 10^3)(23)(0,0916) 10^{-8} \sqrt{2}} = 7483 \text{ gauss}$$

Dengan menggunakan persamaan 3.1 yaitu  $B = \mu H$  atau  $H = B/\mu$  maka diperoleh :

$$\mu = \mu_r \mu_o \text{ dan } \mu_o = 1, \text{ sehingga}$$

$$H_{mak} = B_{mak} / \mu_r \mu_o$$

$$= 7483 / (1)(2000) = 3,74 \text{ oersted}$$

Karena  $B_{mak} = \phi_m / A$ , maka

$$\phi_m = B_{mak} \cdot A = (7.483)(0,0916) = 685 \text{ maxwell}$$

Dalam satuan emu MKS; besarnya  $m_o$  adalah  $4\pi \times 10^{-7}$  sehingga :

$$\mu = \mu_r \mu_o = 2000 \times (4\pi \times 10^{-7}) = 25,12 \times 10^{-4}$$

$$B_{mak} = 7.483 \text{ gauss} = 7.483 \times 10^{-4} \text{ Wb/m}^2$$

maka,

$$H_{mak} = B_{mak} / \mu_o = 7483 \times 10^{-4} / (25,12 \times 10^{-4}) = 297,89 \text{ AT/m}$$

Besarnya luas penampang inti  $A = 0,0916 \text{ cm}^2 = 0,0916 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  maka :

$$\phi_m = B_{mak} \cdot A = (7483 \times 10^{-4}) \times (0,0916 \times 10^{-4})$$

Berdasarkan persamaan 3.6 terlihat bahwa rugi histerisis  $P_h$  dapat dikurangi dengan memperkecil besar lengkung histerisisnya. Karena inti besi lunak mempunyai lengkung yang ramping maka rugi daya histerisisnya lebih kecil daripada inti besi keras. Untuk itu maka agar panas yang timbul pada suatu peralatan yang menggunakan teori elektromagnet seperti mesin listrik, misalnya generator, motor dan transformator barharga kecil, maka harus dipakai inti besi lunak. Persamaan 5.7 menunjukkan bahwa rugi arus pusing  $P_e$  sebagai fungsi frekuensi pangkat dua. Untuk itu maka cara yang dapat dilakukan untuk memperkecil rugi daya arus pusing biasanya adalah dengan membuat inti magnet dalam bentuk plat-plat yang banyak dan diisolasi kemudian direkatkan dan di-pres. Semakin tinggi frekuensi sumber atau catu daya, maka plat-plat inti magnet sebaiknya juga dibuat semakin tipis.

#### 5.4.5. Hukum Ohm untuk Rangkaian Magnet

Seperti diketahui bahwa jika arus mengalir pada suatu kumparan akan dibangkitkan medan magnet yang sering disebut dengan medan magnet induksi. Begitu juga sebaliknya, suatu kumparan yang terletak di dalam medan magnet maka di dalam kumparan tersebut akan timbul arus listrik. Jadi dapat dikatakan bahwa sistem kemagnetan identik atau mempunyai kemiripan dengan sistem kelistrikan. Analogi kemiripan antara sistem kelistrikan dan kemagnetan ditunjukkan pada Tabel 5.4.

**Tabel 5.4 Analogi antara sistem kemagnetan dan kelistrikan**

Sistem kemagnetan		Sistem kelistrikan	
Besaran	Satuan	Besaran	Satuan
Gaya gerak Magnet (ggm), $\mathfrak{S}$	Amper lilit (AT)	Gaya gerak listrik (ggl), E	Volt (V)
Fluks, $\phi$	Weber (Wb)	Arus I	Amper (A)
Reluktansi, $\mathfrak{R}$	AT/Wb	Resistansi, R	Ohm ( $\Omega$ )
Kuat medan Magnet, H	AT/m	Intensitas medan listrik, $\epsilon$	Volt/m (V/m)
Permeabilitas, $\mu$	Wb/AT-m	Konduktivitas, G	Siemen (S)

Dari tabel 3.7 dapat diketahui bahwa dengan mengacu pada hukum ohm seperti pada rangkaian listrik, maka berlaku hubungan untuk rangkain magnet sebagai berikut.

$$\mathfrak{S} = \phi \times \mathfrak{R} = NI \dots\dots\dots (5.8)$$

$$H = \mathfrak{S} X_m$$

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$$

dimana  $\mathfrak{S}$  : gaya gerak magnet atau ggm (AT)

$\mathfrak{R}$  : reluktansi inti magnet (AT/Wb)

**Contoh soal 3.4 :**

Pada contoh soal 3.2, hitunglah reluktansi dari inti besi tersebut dan besarnya ggm (gaya gerak magnet) yang terjadi dalam satuan MKS.

Penyelesaian :

$$l = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$A = 5 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} = 20 \text{ cm}^2 = 20 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\mu = \mu_r \mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \times 2500 = 3,14 \times 10^{-3}$$

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{0,1}{(3,14 \times 10^{-3})(20 \times 10^{-4})} = 16 \times 10^3 \text{ AT/Wb}$$

$$B = 400 \text{ T} = 400 \text{ Wb/m}^2$$

$$\phi = B \times A = (400)(20 \times 10^{-4}) = 0,8 \text{ Wb}$$

$$\mathfrak{S} = \phi \times \mathfrak{R} = 0,8 \times 16 \times 10^3 = 12,8 \text{ AT}$$

**5.5 Rugi – rugi besi pada bahan magnetik**

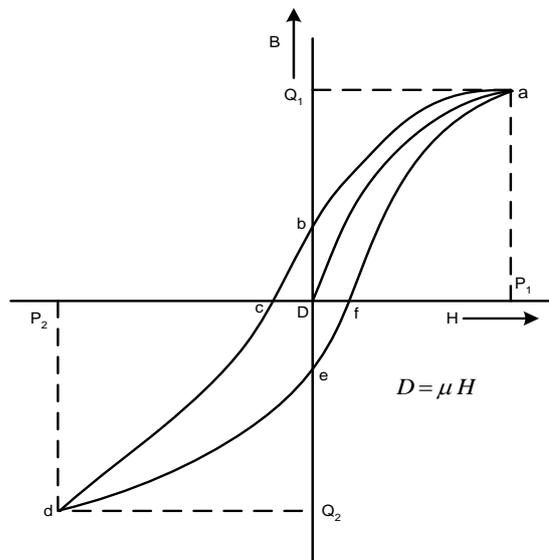
Rugi – rugi besi (iron loss) adalah besarnya kerugian daya yang dinyatakan dalam watt (kadang – kadang dalam watt/kg atau watt/Cb) yang terjadi pada bahan – bahan magnetic, karena induksi yang berubah – ubah.

Rugi – rugi besi ditentukan oleh 2 komponen utama yaitu :

1. Rugi Hysterisis (Ph).
2. Rugi arus pusar/rugi arus eddy (Pe).

**5.5.1. Rugi Hysterisis (Ph)**

Seperti apa yang telah didapatkan dari fisika listrik , bahwa apabila batang besi atau batang dari bahan magnetis lainnya yang diletakkan di dalam medan magnet atau didalam ampere akan terjadi “magnetisasi”.Jadi didalam medan magnit atau didalam lilitan ampere terdapat gaya pemagnitan, dimana besarnya gaya pemagnitan ini tergantung pada jumlah gulungan atau arus yang melewatinya. Gambar dibawah menunjukkan gaya pemagnitan (intensitas medan magnit ) H yang merupakan sumbu datar dan sumbu tegaknya menunjukkan megnetisasi atau induksi.



makin besar intensitas medan magnet H, makin besar pula induksi magnet B, akan tetapi pada suatu titik tertentu perubahan induksi magnet tidak tampak meskipun H harganya bertambah besar. Titik dimana harganya tetap besarnya meskipun harga H diperbesar disebut titik jenuh magnetisasi.

Jadi apabila suatu bahan magnetis diberikan padanya gaya pemagnetan (intensitas medan magnet) H (mulai dari O) dan gaya ini diperbesar sehingga mencapai titik P<sub>1</sub>, maka induksi B juga akan bertambah sampai titik Q<sub>1</sub>, apabila gaya pemagnetan dibalikkan arahnya untuk menghilangkan magnet induksi, maka magnetisasinya makin lama makin berkurang. Pada kenyataannya pada saat gaya pemagnetannya sudah mencapai nol, magnetisasi belum hilang sama sekali, melainkan masih ada yang tertinggal, magnetisasinya yang masih sisa ini disebut "remanensi magnet". (dalam gambar diatas dinyatakan dengan o – b)

Untuk menghilangkan sama sekali remanensi magnet, maka gaya pemagnetan H-nya dibesarkan terus sehingga mencapai titik C. jadi setelah adanya gaya OC, magnetisasi menjadi nol. Dan jika dalam arah terbalik ini harga H terus diperbesar sehingga mencapai P<sub>2</sub>, maka induksi magnet akan menjadi semakin besar, dan harga B-nya menjadi Q<sub>2</sub>, kenaikan magnetisasi ini menuruti garis lengkung c-d. Jika dari sini arah gaya pemagnetan dibalik lagi arahnya dari P<sub>2</sub> ke O dan terus ke P<sub>1</sub>, maka magnetisasi mula – mula turun dari d ke e, kemudian sampai dititik nol f, dan akhirnya sampai dititik a lagi. Siklus pemagnetan dari a-b-c-d-e-f-a disebut lengkung histerisis.

Dari keterangan diatas tampak bahwa induksi magnet B selalu terbelakang terhadap intensitas medan magnet H. artinya pada saat intensitas medan magnet H mencapai nol, iduksi magnet masih ada sisa yang tinggal (o-b), dan setelah arah intensitas medan magnet dirubah arahnya harganya menjadi negative (O-C) maka barulah magnetisasi menjadi nol atau hilang sama sekali.

Terbelakangnya induksi magnet terhadap intensitas medan magnet seperti diatas disebut "histerisis" . sedangkan gaya pemagnetan yang digunakan untuk menghialngkan remanensi magnet seperti yang telah disebut diatas (O – C) dan (O – f) disebut gaya "ko-orsitif". Luasan yang diarsir (o b c) akan menimbulkan panas pada bahan magnetis dan biasanya dinamakan "rugi histerisis).

Panas ini terjadi karena adanya gaya yang menentang berbaliknya, magnet – magnet elementer bahan.

Kerugian histerisis ini dihitung tiap siklus. Apabila induksi maksimum B<sub>max</sub> (titik Q<sub>1</sub> dan Q<sub>2</sub>) telah diketahui, maka menurut percobaan steinmotz yang dilakukan secara empiris dirumuskan sebagai berikut :

$$Ph : \eta \cdot B_{\max}^{1,6} \dots\dots\dots (5.9)$$

Di mana :

$Ph$  : kerugian histerisis (erg / cm<sup>3</sup> / siklus)

$\eta$  : koefisien histerisis yang besarnya tergantung pada tingkatan dan kualitas bahan.

Harga – harga untuk berbagai bahan :

Baja tuang yang keras	: 0,025
Baja tempa	: 0,020
Besi tuang	: 0,012
Besi plat	: 0,004
Besi plat campuran silicon	: 0,0010
Baja plat silicon yang terbaik	: 0,00046
Perwalloy	: 0,0001

Rumus empiris dari Steinmetz ini cukup teliti untuk bahan – bahan yang mempunyai induksi magnet B dari 1000 sampai 12.000 gauss, akan tetapi untuk bahan – bahan Ferromagnetis yang baru dan sekarang banyak digunakan, rumus tersebut kurang teliti. Rumus yang lebih teliti adalah :

$$Ph : \eta B_{\max}^n \text{ erg / cm}^3 \text{ / siklus} \dots\dots\dots (5.10)$$

Harga n diantara 1,5 s/d 2,5 (didapatkan secara empiris) apabila volume bahan dalam cm<sup>3</sup> dinyatakan dengan V, dan pemagnitan selalu berubah – berubah harganya seperti pada teknik listrik arus bolak – balik / arus tukar dengan frekuensi f (siklus/detik), sedangkan induksi magnet merata pada seluruh bahan, maka kerugian histerisis menjadi :

$$Ph : \eta \cdot v \cdot f \cdot B_{\max}^n \quad (\text{erg / det}) \text{ atau}$$

$$Ph : \eta \cdot v \cdot f \cdot B_{\max}^n \cdot 10^{-7} \quad \text{watt} \quad \dots\dots\dots (5.11)$$

$$\rightarrow 1 \text{ watt} = 10^7 \text{ erg / det}$$

### 5.5.2 Rugi arus pusar (eddy current losses)

Jika teras dari bahan magnetis ditempatkan didalam gulungan magnet dan gulungan itu dilalui arus listrik bolak – balik/ arus tukar maka akan terjadi gaya motor listrik (gml) induksi didalam teras itu sendiri. Dan arah arus ini akan berlawanan dengan arah arus yang ada didalam gulungan kawat. Arus induksi ini dinamakan “ arus pusar”/ Eddy current.

Untuk teras besi yang terdiri dari bahan pejal utuh, maka harga arus pusar akan besar, karena perlawanan didalam teras itu sendiri kecil sekali. Untuk mencegah supaya tidak terjadi arus pusar yang besar, maka teras dibuat dari plat – plat tipis yang kemudian disusun sehingga menjadi bentuk teras sesuai dengan yang diinginkan.

Plat yang berlapis – lapis ini di isolasi pada permukaannya dan biasanya diisolasi oksida.

Secara keseluruhan perlawanan plat – plat ini menjadi besar, sehingga arus pusarnya menjadi kecil.

Dengan adanya arus pusar, maka didalam teras besi terdapat tenaga listrik dan tenaga listrik ini berubah menjadi panas yang merupakan kerugian. Selanjutnya kerugian ini disebut “kerugian tenaga arus pusaran”.

Secara empiris rugi arus pusar dinyatakan sebagai

$$P_o : \frac{(\pi \cdot t \cdot f \cdot B_{\max})^2 \cdot V}{6 \cdot c \cdot 10^{16}} \quad (\text{watt}) \dots \dots \dots (5.12)$$

di mana :

- $P_o$  : rugi arus pusar (watt)
- $t$  : tebal plat (cm)
- $f$  : frekuensi (hertz) = siklus / det
- $c$  : perlawanan jenis teras (Ohm – cm)
- $V$  : Volume teras besi (cm<sup>3</sup>)
- $B_{\max}$  : ke rapat an fluks max

Untuk :

- $V$  : dalam m<sup>3</sup>
- $t$  : dalam m
- $c$  : dalam Ohm – m
- $f$  : frekuensi (hertz) = siklus / det
- $B_{\max}$  : dalam weber / m<sup>2</sup>

maka :

$$P_o : \frac{(\pi \cdot t \cdot f \cdot B_{\max})^2 \cdot V}{6 \cdot c} \quad \text{Watt} \dots \dots \dots (5.13)$$

Baja plat yang mengandung silicon mempunyai perlawanan jenis yang lebih besar, sehingga arus pusar dapat diperkecil, selanjutnya arus pusar kecil → rugi histerisis berkurang.

Baja plat dynamo yang mengandung silicon mempunyai prosentase yang berbeda – beda menurut penggunaannya, misalnya :

- Untuk gulungan medan magnit, mengandung silicon  $\frac{1}{4}$  sampai 1 %
- Untuk plat dynamo biasa mengandung silicon sampai  $2 \frac{1}{2}$  %
- Untuk motor khusus dengan daya guna yang tinggi mengandung silicon  $3 \frac{1}{4}$  % .
- Plat baja untuk transformator mengandung silicon 4 – 5 %.

Tabel 5.5 Bahan – Bahan Teras Elektromagnet

No	Nama Bahan Teras	Silikon (%)	P <sub>h</sub> untuk B = 10.000 (erg/cm <sup>3</sup> /siklus)	Tahanan jenis (Ohm – cm)
1	Baja plat jenis	0,5	2,750	18
2	armature	2,5	2,530	40
3	Baja plat dynamo	3,25	2,030	48
4	Baja plat dynamo khusus	3,80	1,890	56
5	Baja plat trafo radio	3,6	1,475	51
6	Baja plat trafo audio B	3,6	1,305	51
7	Baja plat trafo audio A	4,25	1,815	60
	Baja plat trafo audio C			

Catatan : P<sub>h</sub> = rugi histerisis (erg/cm<sup>3</sup>/siklus)

### 5.5.3. Rugi besi

Rugi besi yang terdapat didalam alat – alat elektromagnet seperti motor listrik, generator, transformator dan sebagainya, adalah kerugian tenaga listrik didalam teras yang hilang dan berubah menjadi panas.

Kerugian ini merupakan gabungan dari kerugian histerisis dan kerugian arus pusar.

Jadi :

Rugi besi :

$$P_{besi} : P_h + P_o$$

$$\eta \cdot V \cdot f \cdot B_{max} \cdot 10^{-7} \frac{(\pi \cdot t \cdot f \cdot B_{max})^2 \cdot V}{6 \cdot e \cdot 10^{16}} \quad (Watt) \dots\dots\dots (5.14)$$

Soal – soal.

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan bahan magnet
2. Bagaimana cara mendapatkan magnet secara buatan
3. Apa yang dimaksud dengan magnet remanen dan magnet permanen sebutkan contoh serta penggunaannya.
4. Sebutkan macam-macam bahan inti magnet
5. Bagaimana definisi magnet menurut weber dan weiss
6. Gambarkan besarnya energi pada inti magnet dan turunkan persamaan energi yang tersimpan dalam inti magnet bila arus sebagai fungsi waktu.
7. Sebatang besi lunak dengan ukuran 7 x 2 x 3 cm, mempunyai permeabilitas relatif 1200 besi di beri lilitan dan arus sehingga menjadi magnet dengan rapat fluks sebesar 400 tesla, hitung energi yang terkandung dalam inti tersebut jika permeabilitas hampa udara  $4\pi \times 10^{-7}$
8. Sebatang besi homogen berbentuk batang dengan ukuran 15 x 3 x 2 cm, permeabilitas relatif 2500, dengan rapat fluks sebesar 200 tesla, permeabilitas ruang hampa  $4\pi \times 10^{-7}$  hitung reluktansi dari inti besi tersebut.
9. Jelaskan apa yang dimaksud dengan rugi arus eddy dan rugi arus pusar pada bahan magnet



## Daftar Pustaka.

- Ansori, Erfan., 1986., *Kimia untuk SMA.*, Gama Exacta Bandung
- J. Pascoe., 1985., **Properties of Materials for Electrical Engineering.**, University lecturer in Engineering and Fellow of St.Jhon's College. Cambridge.
- Lawrence H. Van Vlack., diterjemahkan oleh Ir. Sriati Djafrie , ME,M,Met, 1983., Ilmu dan Teknologi Bahan ( Ilmu logam dan bukan logam)., Erlangga., Jakarta.
- Muhaimin., 1991., Bahan-Bahan Listrik untuk Politeknik., PT. Pradnya Paramita., Jakarta.
- Sumanto., 1996., Pengetahuan Bahan untuk Mesin dan Listrik., Andi Offset, Yogyakarta.
- Surdia,Tata, saito, Shinroku., 1999., Pengetahuan Bahan Teknik., Pradnya paramita, Jakarta.
- Ir. Setyo Saksomo., 1986., Diktat Ilmu Bahan Listrik., Universitas Brawijaya, malang



## Glosarium

Atom	: adalah suatu materi yang terdiri atas inti atom yang bermuatan positif serta bagian yang mengelilingi yang bermuatan negatif
Molekul	: Gabungan antara atom atom dengan aturan tertentu
Elektron	: Partikel dari sub atom yang bermuatan negatife
Allowed band	: Pita energi yang dimana disitu terdapat sejumlah elektron
Energi gap	: suatu batas antara pita valensi dan pita konduksi.
Konduktor	: suatu bahan yang dapat di gunakan untuk membawa aliran listrik
Tahanan	: suatu besaran yang menyatakan adanya hambatan dari bahan penghantar.
Tahanan jenis ( $\rho$ )	: suatu besaran tahanan yang menyatakan nilai hambatan pada suatu jenis penghantar.
Skin effect	: gejala ketidak samaan rata arus yang mengalir dalam suatu penghantar.
Karakteristik mekanis	: suatu sifat bahan yang tahan terhadap gejala tarikan dan tekanan pada bahan tersebut.
Tensile test	: kekuatan uji tarik pada bahan
Compression test	: kekuatan uji tekan pada bahan
Elastic limit	: sifat bahan yang cenderung akan kembali ke bentuk semula setelah Mengalami perubahan bentuk karena pengaruh gaya tarik atau gaya tekan.
Deformasiplastis	: suatu perubahan bentuk dari bahan yang tidak dapat kembali le bentuk semula.
Ultimate tensile strength	: batas tegangan maksimum yang didapatkan dalam uji tarik.
Ductility	: merupakan sifat mekanis bahan yang menunjukkan derajat : Deformasiplastis yang terjadi sebelum suatu bahan putus atau gagal pada uji tarik.
Resielience	: kapasitas suatu bahan dalam menyerap energi dalam fase perubahan elastisitas.
Toughness	: kapasitas suatu bahan menyerap energi dalam fase plastis sampai bahan tersebut putus.
Strain hardening	: naiknya nilai tegangan berbanding regangan setelah memasuki masa fase plastis.
Kemampuan hantar arus	: kemampuan suatu penghantar untuk mengalirkan arus listrik yang melewatinya tanpa mengabaikan terjadinya perubahan bentuk atau terjadinya panas yang berlebihan.
Daya hantar Panas	: jumlah panas yang melalui bahan tiap satu satuan waktu.

Gejala corona	: adanya ionisasi dalam udara di sekitar penghantar
Thermistor	: suatu macam tahanan yang peka terhadap pengaruh suhu.
Semikonduktor	: suatu bahan dengan konduktivitas listrik yang berada diantara isolator dan konduktor
Intrinsic semi konduktor	: semikonduktor murni tanpa ada bahan pengotor
Extrinsic semikonduktor	: semikonduktor yang sudah diberi bahan pengotor ( doping).
Transistor	: adalah bahan semikonduktor yang digun akan sebagai penguat, sebagai sirkuit pemutus dan penyambung dan stabilisasi tegangan
Dioda	: komponen aktif dua kutub yang bersifat semikonduktor yang berfungsi sebagai penyearah tegangan/arus dari arus bolak-balik ( AC) ke arus searah ( DC) aau sebaliknya.
Isolator	: bahan yang sulit melakukan perpindahan muatan listrik.
Kerugian sudut dielektrik	: suatu bahan jika di aliri arus bolak-balik maka bahan tersebut akan mengambil energi dalam bentuk panas
Kekuatan dielektrik	: gradien tegangan maksimum yang mampu di tahan oleh dielektrik sebelum terjadinya kegagalan isolasi.
Breakdown voltage	: kegagalan isolasi dalam menahan tegangan yang dikenakan pada bahan tersebut
Impuls strength	: sejauh mana kekuatan suatu bahan isolator dapat menahan tegangan impuls yang terjadidalam sesaat.
Magnet	: suatu benda yang mempunyai suatu medan magnit yang dapat dapat menarik besi, baja atau benda magnit lainnya.
Ferromagnetik	: bahan yang dapat mengalirkan garis gaya magnet dengan baik
Diamagnetik	: bahan yang sukar mengalirkan garis-garis gaya magnet
Paramagnetic	: bahan yang dapat mengalirkan garis—garis gaya magnet tetapi tidak banyak
Rugi besi pada bahan magnit	: besarnya kerugian daya yang terjadi pada bahan magnetic karena induksi yang berubah- ubah
Rugi hysteresis	:Tertinggal nya fluks magnit (B) terhadap perubahan kuat magnet (H) pada rangkaian magnetik.
Rugi arus edy	: arus yang timbul dari adanya pemotongan medan magnet oleh penghantar yang di gerak-gerakkan di sekitar medan magnit
Rugi besi	: rugi yang disebabkan oleh fluks bolak-balik pada inti besi
Rugi tembaga	: disebabkan adanya arus yang mengalir pada lilitan tembaga