

**MODUL PEMBELAJARAN**

**KODE : MK.MTP 3**

# **ILMU BAHAN LISTRIK**

BIDANG KEAHLIAN : KETENAGALISTRIKAN  
PROGRAM KEAHLIAN : TEKNIK TRANSMISI



PROYEK PENGEMBANGAN PENDIDIKAN BERORIENTASI KETERAMPILAN HIDUP  
**DIREKTORAT PENDIDIKAN MENENGAH KEJURUAN**  
**DIREKTORAT JENDERAL PENDIDIKAN DASAR DAN MENENGAH**  
**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL**  
**2003**

## KATA PENGANTAR

Bahan ajar ini disusun dalam bentuk modul/paket pembelajaran yang berisi uraian materi untuk mendukung penguasaan kompetensi tertentu yang ditulis secara sekuensial, sistematis dan sesuai dengan prinsip pembelajaran dengan pendekatan kompetensi (*Competency Based Training*). Untuk itu modul ini sangat sesuai dan mudah untuk dipelajari secara mandiri dan individual. Oleh karena itu walaupun modul ini dipersiapkan untuk peserta diklat/siswa SMK dapat digunakan juga untuk diklat lain yang sejenis.

Dalam penggunaannya, bahan ajar ini tetap mengharapkan asas keluwesan dan keterlaksanaannya, yang menyesuaikan dengan karakteristik peserta, kondisi fasilitas dan tujuan kurikulum/program diklat, guna merealisasikan penyelenggaraan pembelajaran di SMK. Penyusunan Bahan Ajar Modul bertujuan untuk menyediakan bahan ajar berupa modul produktif sesuai tuntutan penguasaan kompetensi tamatan SMK sesuai program keahlian dan tamatan SMK.

Demikian, mudah-mudahan modul ini dapat bermanfaat dalam mendukung pengembangan pendidikan kejuruan, khususnya dalam pembekalan kompetensi kejuruan peserta diklat.

Jakarta, 01 Desember 2003  
Direktur Dikmenjur,

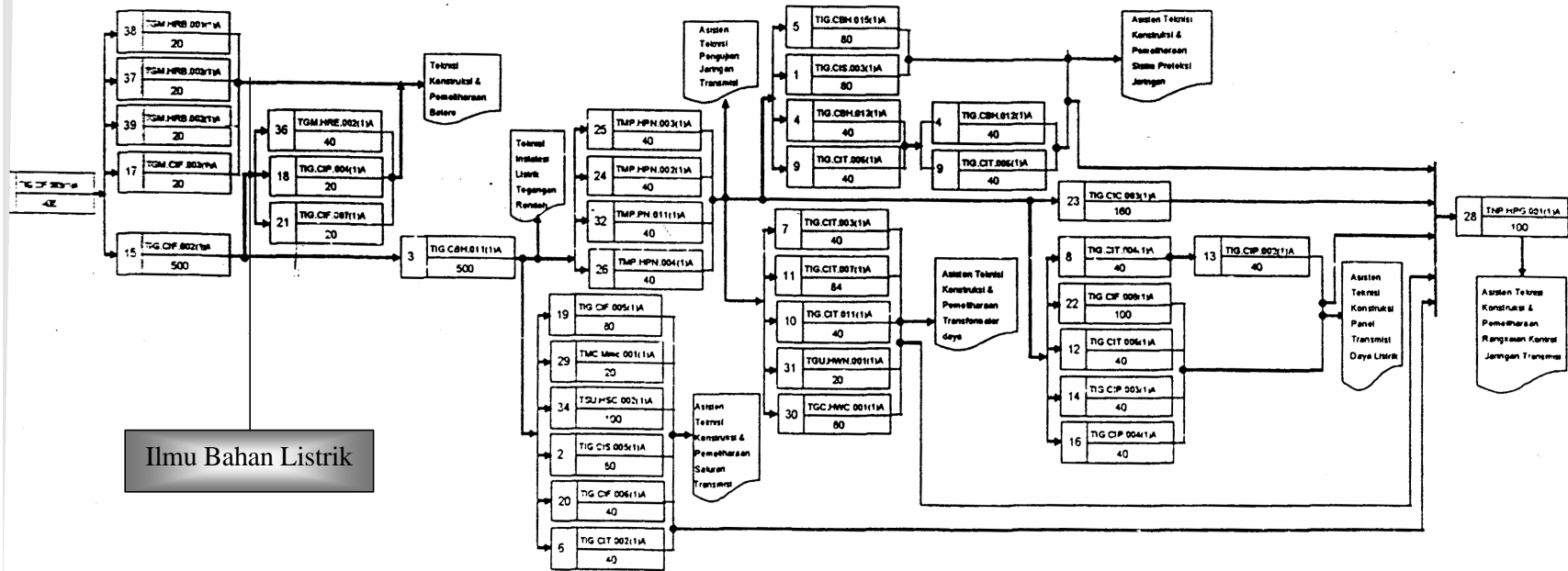
Dr. Ir. Gator Priowirjanto  
NIP 130675814

# DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR .....	i
REKOMENDASI .....	ii
DAFTAR ISI .....	iv
PETA KEDUDUKAN MODUL .....	v
GLOSARRY/PERISTILAHAN	
I PENDAHULUAN	1
A. Deskripsi .....	1
B. Prasyarat .....	1
C. Petunjuk Penggunaan Modul .....	2
D. Tujuan Akhir.....	3
E. STANDAR KOMPETENSI.....	4
F. Cek Kemampuan .....	6
II PEMBELAJARAN	7
A. RENCANA BELAJAR PESERTA DIKLAT.....	7
B. KEGIATAN BELAJAR. ....	8
Kegiatan Belajar 1	8
A. Tujuan Kegiatan .....	8
B. Uraian Materi .....	8
C. Rangkuman 1 .....	18
D. Tugas 1 .....	20
E. Formatif 1 .....	21
F. Jawaban Test Formatif 1 .....	25
Kegiatan Belajar 2	26
A. Tujuan Kegiatan .....	26
B. Uraian Materi .....	26
C. Rangkuman 2 .....	48
D. Tugas 2 .....	50

E.	Test Formatif 2 .....	52
F.	Jawaban Test Formatif 2 .....	55
G.	Lembar Kerja Praktek.....	56
III	EVALUASI .....	58
IV	PENUTUP .....	65
	DAFTAR PUSTAKA .....	66
	STORYBOARD .....	68

## PETA KEDUDUKAN MODUL



**Keterangan :**

Nomor Kompetensi dari daftar keseluruhan kompetensi program keahlian teknik

□ = Outlet

← Nomor Kode Kompetensi  
← Jam Pencapaian Kompetensi

## **PERISTILAHAN/GLOSSARY**

- Konduktor*** : sifat dari salah satu bahan yang dapat menghantarkan listrik
- Semi konduktor*** : salah satu karakteristik dari bahan yang berfungsi sebagai konduktor atau non konduktor dalam keadaan tertentu
- Isolator*** : bahan –bahan yang tidak dapat menghantarkan listrik alam kondisi apapun.
- Higroskopisitas*** : sifat bahan yang dapat menyerap air dari sekelilingnya.

## **I. PENDAHULUAN**

### **A. DESKRIPSI**

Modul ini secara formal diberi judul “Ilmu Bahan Listrik” yang didalamnya memuat secara sistematis tentang pengertian bahan-bahan listrik, sifat/karakteristik, dan pemakaian bahan listrik dalam system tenaga listrik. Substansi materi yang ditonjolkan bersifat teoritis praktis dengan prosentase praktis jauh lebih besar. Materi modul terkait erat dengan materi modul yang lain seperti fisika, teknik listrik dan ilmu gaya. Diharapkan peserta diklat setelah mempelajari struktur modul dengan benar dapat melakukan praktek kerja lapangan yang sesuai atau mempunyai kompetensi yang memadai apabila diterjunkan praktek kerja di berbagai industri. Manfaat kompetensi materi ini secara makro dapat bekerja sebagai tenaga professional di industri terkait .

Pengetahuan : Memahami secara konsepsional ilmu bahan listrik berdasarkan literature yang ada.

Keterampilan : Melakukan identifikasi konsep/teori dengan kondisi lapangan

Sikap : Menempuh seluruh prosedur pembelajaran dengan sikap dan etika yang baik dan benar sesuai standar

### **B. PRASYARAT**

Untuk mempelajari modul ini diharapkan siswa telah memperoleh mata diklat :

1. Fisika
2. Gambar Listrik
3. Teknik Listrik

### **C. PETUNJUK PENGGUNAAN MODUL**

#### 1. Bagi Siswa

- ✎ Unit modul ini hendaknya dipelajari sesuai urutan aktivitas yang diberikan yaitu setelah mempelajari isi materi pelajaran pada kegiatan belajar, kerjakan soal, soal pada latihan di bagian akhir setiap unit kegiatan belajar. Kemudian hasilnya dibandingkan dengan kunci jawaban yang ada.
- ✎ Sebaiknya modul ini dipelajari secara berkelompok, tetapi jika tidak memungkinkan sdr. Dapat mempelajari sendiri.
- ✎ Sdr harus mempelajari modul ini secara sistematis artinya sdr. dapat terus mempelajari unit berikutnya apabila bagian unit sebelumnya telah difahami dengan baik.

#### 2. Bagi Guru

Guru sebagai fasilitator perlu pula membaca modul dan memperhatikan hal-hal sebagai berikut :

- ✎ Unit modul ini terdiri dari beberapa unit kegiatan belajar.
- ✎ Sebelum membaca modul ini perlu difahami terlebih dahulu yakni tujuan pembelajaran dan satuan kompetensi yang harus dicapai
- ✎ Struktur modul terdiri dari pendahuluan yang meliputi tujuan, ruanglingkup, prasyarat, dan evaluasi. Kemudian bagian pembelajaran yang memuat secara detail materi yang harus diajarkan.

### **D. TUJUAN AKHIR**

Setelah mempelajari modul ini diharapkan peserta diklat :

1. Memahami dengan baik sifat dan karakteristik bahan listrik.
2. Mampu memahami bahan-bahan listrik yang dipakai dalam system tenaga listrik
3. Mempunyai gambaran awal tentang sifat bahan listrik pada tegangan tinggi.



## **E. STANDAR KOMPETENSI**

Kode Kompetensi : MK. 35

Unit Kompetensi : Pemahaman Ilmu Bahan Listrik

Ruang Lingkup :

Unit Kompetensi ini berkaitan dengan pemahaman konsep dasar tentang materi ilmu bahan listrik. Pemahaman ilmu bahan listrik mencakup materi bahan-bahan listrik yang digunakan dalam secara aplikatif dalam teknik transmisi. Mulai dari bahan pengantar(konduktor), bahan isolator dan bahan-bahan yang dipakai dalam tegangan tinggi.

Sub Kompetensi 1 :

Melakukan proses pembelajaran tentang konsep bahan listrik

KUK :

1. Seluruh bahan/material yang diperlukan dalam teknik transmisi dapat dianalisis dan difahami dengan baik
2. Prosedur kerja pembelajaran dapat dilakukan dengan baik berdasarkan prinsip-prinsip pembelajaran kompetensi dan sesuai standar perusahaan.

Sub Kompetensi 2 :

Melakukan studi lapangan sebagai pembelajaran empirik atau membandingkan antara teori/konsep bahan listrik dengan kondisi lapangan.

KUK :

1. Melakukan proses pembelajaran lapangan sesuai prosedur perusahaan
2. Prosedur pelaporan hasil pembelajaran/praktek industri dikerjakan dengan baik dan sesuai standar pelaporan karya ilmiah

Sub Kompetensi 3 :

Melakukan uji kompetensi tentang pemahaman dasar bahan-bahan listrik

KUK :

1. Prosedur uji kompetensi ditempuh dengan baik dan dilakukan oleh pihak berwenang
2. Melakukan identifikasi hasil uji kompetensi terhadap satuan-satuan kompetensi yang diperlukan.

Kode Modul : MK. MTP 3

**F. TES AWAL**

Untuk mengetahui sampai sejauh mana kesiapan awal peserta diklat berkaitan dengan materi modul ini, maka akan diajukan pertanyaan-pertanyaan berikut :

1. Jelaskan apa yang dimaksud konduktor, semikonduktor dan isolator ?
2. Sebutkan bahan-bahan listrik yang sudah dalam tenaga listrik ?
3. Berikan contoh bahan isolator yang dipakai dalam tenaga listrik ?
4. Jenis konduktor apa saja yang banyak dipakai dalam sistem tenaga listrik ?

## **II. PEMBELAJARAN**

### **A. RENCANA BELAJAR PESERTA DIKLAT**

Rencana pembelajaran dilakukan dalam dua bentuk pertama dalam bentuk tatap muka di kelas yang diarahkan pada pencapaian kompetensi pemahaman selama 4 jam per minggu. Jenis pembelajaran ini menghabiskan 40 % dari seluruh kompetensi yang akan di capai. Sedangkan model pendekatan kedua adalah melakukan kegiatan lapangan baik dalam bentuk simulasi komputer maupun langsung ke lokasi/industri terkait seperti praktek kerja lapangan dan sebagainya.

### **B. Kegiatan Belajar**

Dalam tahap kegiatan belajar guru diharapkan dapat mendorong serta membangun iklim yang baik sehingga proses pembelajaran secara mandiri dapat berlangsung dengan benar sesuai dengan proses dan mekanisme standar sehingga dihasilkan sebuah produk kegiatan belajar yang optimal.

#### **1. Kegiatan Belajar 1, Pengantar Ilmu Bahan Listrik**

Tujuan : Setelah mempelajari modul ini diharapkan peserta diklat memahami secara komprehensif bahan listrik dan aplikasinya.

#### **2. Kegiatan Belajar 2, Bahan Penghantar Listrik**

Tujuan : Setelah mempelajari modul ini diharapkan peserta diklat memahami secara komprehensif tentang pengantar ilmu bahan listrik

#### **3. Kegiatan Belajar 3, Bahan Isolasi**

Tujuan : Setelah mempelajari modul ini diharapkan peserta diklat memahami secara komprehensif tentang karakteristik isolasi bahan listrik

#### **4. Kegiatan Belajar 4, Gejala Medan Tinggi Bahan Listrik**

Tujuan : Setelah mempelajari unit kegiatan belajar 4 modul ini diharapkan peserta diklat memahami secara komprehensif tentang gejala medan tinggi bahan listrik

Uraian materi selengkapnya dapat dipeleajari pada halaman-halaman berikutnya !

## **KEGIATAN BELAJAR 1**

### **PENGANTAR ILMU BAHAN LISTRIK**

#### **A. Umum**

Bahan listrik dalam sistem tenaga listrik merupakan salah satu elemen penting yang akan menentukan kualitas penyaluran energi listrik itu sendiri. Bahan listrik yang sangat populer selama ini meliputi konduktor, semi konduktor dan isolator. Satu lagi yang dikenal dengan super konduktor, namun masih dalam penelitian intensif para ahli. Ketiga bahan tadi secara integrative dalam system kelistrikan dimanfaatkan secara optimal. Seperti misalnya konduktor adalah salah material paling besar yang dipakai dalam penyaluran tenaga listrik baik aluminium maupun tembaga atau campuran dengan bahan lain. Demikian pula isolator dipakai banyak sekali untuk menyekat bagian bagian bertegangan dengan bagian yang kontak langsung dengan manusia

Dalam teknik listrik, khususnya pada pelajaran praktek, mempelajari dan memahami bermacam-macam bahan beserta sifat-sifatnya merupakan hal yang sangat penting, guna memilih suatu bahan penyekat misalnya, bahan tadi perlu disesuaikan dengan penggunaannya, umpamanya penyekat harus memiliki sifat-sifat tahanan jenis yang besar, tahan terhadap lembab, panas, reaksi bahan kimia dan sebagainya. Selain sifat, bahan juga mempunyai bermacam-macam bentuk. Pada umumnya kita mengenal tiga macam bentuk, yaitu padat, cair, dan gas. Ada pula bahan-bahan yang memiliki ketiga bentuk tersebut pada suhu-suhu tertentu. Sebagai contoh dapat kita ambil air. Dalam keadaan biasa air berbentuk cair. Jika air kita panaskan hingga suhunya naik sampai  $100^{\circ}\text{C}$  atau lebih, air mulai menguap berarti bentuk cairnya berubah menjadi bentuk gas. Pendinginan kembali uap itu sampai suhu semula, akan merubah bentuknya lagi menjadi cair.

Bilamana pendinginan tersebut diteruskan sampai suhunya mencapai  $0^{\circ}\text{C}$  ke bawah, bentuknya berubah menjadi padat. Dalam bentuk padat ini air dikenal dengan nama es. Ada kalanya bahan-bahan yang dalam keadaan biasa berbentuk padat, melalui proses pemanasan dijadikan cair, supaya dapat dituangkan kedalam acuan (cetakan), kemudian setelah didinginkan kembali menjadi padat lagi dengan bentuk sebagai barang jadi. Sebagai contoh kita sebutkan bahan bakelit, besi dan tembaga.

### 1. Benda Padat

Benda padat mempunyai bentuk yang tetap (mempunyai bentuk sendiri). Pada suhu yang tetap benda padat mempunyai isi yang tetap pula. Isi akan bertambah, atau disebut benda akan memuai jika mengalami kenaikan suhu dan sebaliknya benda akan menyusut jika suhunya menurun. Karena berat benda tetap, maka kepadatan benda akan berubah. Jika isi (volume) bertambah (memuai), kepadatannya berkurang. Jika isinya berkurang (menyusut), kepadatannya bertambah. Jadi benda lebih padat dalam keadaan dingin daripada dalam keadaan panas. Untuk lebih jelas lagi, rumusnya dapat kita tulis sebagai berikut:

$$P = \frac{M}{V}$$

P = Kepadatan dengan satuan  $\text{gram}/\text{cm}^3$ . ( $\text{cm}^3 = \text{cc} = \text{centimeter cubik}$ ).

M = Massa dengan satuan gram.

V = Isi (volume) dengan satuan  $\text{cm}^3$  atau c.c.

Pemuaian benda yang satu dengan yang lain berbeda. Koefisien muai ruang dapat dilihat dengan tabel.

Koefisien muai-ruang suatu benda ialah bilangan yang menunjukkan pertambahan ruang dalam  $\text{cm}^3$  suatu benda yang isinya  $1 \text{ cm}^3$ , bila mana suhunya dinaikan  $1^{\circ}\text{C}$ .

Dalam rumus ketentuan ini dapat kita tulis sebagai berikut:

$$V_{t_2} = V_{t_1} \left[ 1 + \gamma (t_2 - t_1) \right]$$

dalam satuan cc.

$V_{t_2}$  = Volume benda pada suhu  $t_2$ °C dalam satuan cc.

$t_1$  = Suhu benda sebelum dipanasi.

$t_2$  = Suhu benda sesudah dipanasi

$\alpha$  = Koefisien muai-ruang (alpha)

Jika kita akan menghitung perpajangan saja, maka kita dapat memakai koefisien muai-panjang  $\lambda$  (lambda).

*Ketentuan :*

Koefisien muai-panjang suatu benda ialah bilangan yang menunjukkan pertambahan panjang dalam cm suatu benda yang panjangnya 1 cm. Bila suhunya dinaikkan 1° C.

Untuk jelasnya, rumusnya dapat kita tulis sebagai berikut :

$$L_{t_2} = L_{t_1} [1 + \lambda (t_2 - t_1)]$$

$L_{t_1}$  = Panjang benda padat  $t_1$ °C dalam satuan cm.

$L_{t_2}$  = Panjang benda pada  $t_2$ °C dalam satuan cm.

$t_1$  = Suhu benda sebelum dipanasi dalam °C.

$t_2$  = Suhu benda sesudah dipanasi dalam °C.

$\lambda$  = Koefisien muai-panjang (lambda).

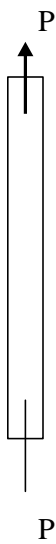
## 2. Sifat Mekanis

Jika pada benda padat bekerja gaya-gaya luar, maka benda tersebut akan mengalami perubahan bentuk. Besarnya perubahan bentuk tersebut tergantung pada besar kecilnya gaya, benda dan dari bahan apa benda itu dibuat. Jika gaya luar tadi tidak lagi bekerja, maka ada tiga kemungkinan yang akan terjadi yaitu :

- bentuk benda akan kembali pada bentuk semula.
- bentuk benda sebagian saja kembali pada bentuk semula.
- bentuk benda berubah sama sekali.

Kejadian seperti pada a dapat terjadi, karena benda tersebut mempunyai sifat kenyal (elastis). Kejadian seperti pada b hanya sebagian saja yang dapat kembali pada bentuk semula. Ini dapat terjadi, apabila besar gaya yang bekerja meapuai suatu batas, yang disebut *batas kekenyalan* sehingga sifat kekenyalan menjadi berkurang. ada kejadian c besar gaya yang bekerja jauh melampaui batas kekenyalan, sehingga sifat kekenyalan sama sekali hilang. Pada bangunan gaya yang akan bekerja pada bahan-bahan yang akan dipakai untuk pembuatan bangunan itu harus diperhitungkan jangan sampai melampaui batas kekenyalan itu. Tegangan patah. Tiap bahan yang mengalami pembebanan, jika beban ditambah terus-menerus, mula-mula mengalami perubahan bentuk, akhirnya akan patah. Tegangan patah ialah batas tegangan dalam  $\text{kg/cm}^2$ , dimana bahan akan patah, bila bebannya melampaui batas ini. Maka pada tiap-tiap bangunan, perlu adanya perhitungan yang teliti, supaya bahan-bahan untuk pembuatan bangunan itu tidak mengalami pembebanan yang melebihi batas yang telah ditentukan dalam peraturan keamanan. Tegangan tarik/ tekan . Gambar 1-1 menunjukkan sebuah batang yang menahan dua gaya P dan P<sub>t</sub> yang sama besarnya, tetapi berlawanan arahnya. Maka pada tiap-tiap potongan normal bekerja gaya dalam sebesar P. Maka besarnya tegangan pada potongan normal ada :

$$C_t = \frac{P}{q}$$



P = besar gaya yang bekerja (kg)

q = luas potongan normal ( $\text{cm}^2$ )

C<sub>t</sub> = tegangan ( $\text{kg/cm}^2$ )

Dari rumus ini kita menulis :

$$C_t = \frac{P}{q}$$

Gambar 1-1 Sifat bahan padat

Dalam hal ini  $\sigma_t$  adalah besar tegangan yang diizinkan membebani bahan, dari apa batang itu dibuat. Jika besarnya  $q$  telah tertentu, maka  $P$  merupakan gaya paling besar yang boleh membebani batang tersebut. Jika  $P$  merupakan gaya tarik maka tegangan tarik ditulis  $\sigma_t$ , dan jika  $P$  merupakan gaya tekan, tegangan tekan ditulis  $\sigma_c$ . Besar batas proporsional, batas-elastis dan batas-patah untuk tiap-tiap bahan dapat dengan percobaan-percobaan. Kecuali itu besarnya tegangan yang diizinkan  $\sigma_c$  masih tergantung pula pada macamnya muatan, antara lain sebagai berikut:

- Muatan yang bersifat diam dan tetap besarnya, disebut muatan statis.
- Muatan santak mempunyai satu arah, tetapi berubah antara nol dan nilai tertinggi. Untuk muatan ini tegangan yang diizinkan harus diambil dua pertiga daripada tegangan yang diizinkan untuk muatan statis.
- Muatan berganti-ganti bekerja dengan arah yang berganti-ganti. Untuk muatan ini tegangan yang diizinkan  $\sigma_c$  harus diambil sepertiga daripada tegangan yang diizinkan untuk muatan statis.

### B. Perubahan bentuk karena beban.

Jika suatu batang mengalami beban tarik/tekan, maka ia akan memanjang/memendek. Menurut percobaan Robert Hooke, batang yang panjangnya 1 cm dibawah batas muatan yang tertentu, pemanjangan/memendekan. Berbanding lurus dengan gaya tarik/tekan ( $P$ ). Berbanding lurus dengan panjang semula ( $l$ ). Berbanding terbalik dengan luaspotongan  $q$ . Tergantung pada macam bahan batang tersebut. Dapat ditulis dengan rumus, yang disebut rumus Hooke sebagai berikut :

$$\Delta l = \frac{P l}{E q}$$

$\Delta l$  = Perpanjangan /perpendekan dalam satuan cm.

$P$  = Besar beban dalam satuan kg.

$l$  = Panjang batang sebelum dibebani dalam satuan cm

$E$  = Modulus elastisitas; angka tetap yang besarnya tergantung pada macam bahan.

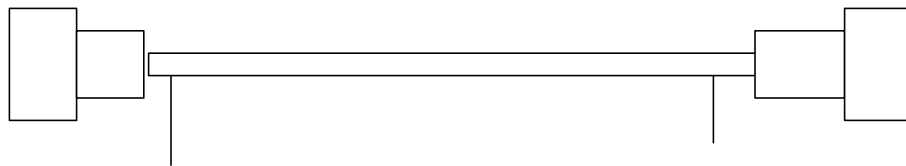


$q =$  Luas potongan dalam satuan  $\text{cm}^2$ .

Hukum Hooke ini hanya berlaku, bila beban tidak melampaui batas kekenyalan bahan batang tersebut. Sebagai batas biasanya dipergunakan tegangan yang diizinkan  $\sigma_c$  dan ini diambil selalu di bawah batas kekenyalan yang disebut batas proporsional.

### C. Diagram tegangan Perpanjangan

Untuk mendapat gambaran yang jelas tentang sifat-sifat mekanis suatu bahan, misalnya bahan baja, diadakan percobaan-percobaan dalam bangku tarik.



Titik batas ukur

titik batas ukur

Gambar 1-2 Sifat tarik bahan

Gambar 1-2 menunjukkan bentuk bahan yang akan mengalami percobaan dalam rangka tarik. Selama percobaan pada muatan-muatan yang tertentu, dapat diukur perpanjangannya  $\Delta l$  hingga dapat dibuat suatu grafik mengenai hubungan antara tegangan-tarik dan perpanjangannya. Gambar 1-3 memperlihatkan grafik tersebut, yang dikenal dengan nama diagram tegangan-perpanjangan. Pada permulaan percobaan ternyata tegangan-tarik  $\sigma_t$  berbanding lurus dengan perpanjangannya, sehingga garis O-P merupakan garis lurus. Titik P inilah yang disebut batas proporsional. Sampai di titik inilah hukum Hooke berlaku. Beban yang melebihi batas proporsional ini menyebabkan garis mulai menyimpang dari garis lurus itu, sehingga hukum Hooke tidak berlaku lagi. Sedikit di atas batas proporsional terdapat batas kekenyalan. Sampai batas ini saja bahan masih mempunyai sifat elastis 100%  $C_E$ . Pada muatan yang lebih tinggi lagi, baja mencapai apa yang disebut batas luluh. Pada tegangan-luluh ini perpanjangannya

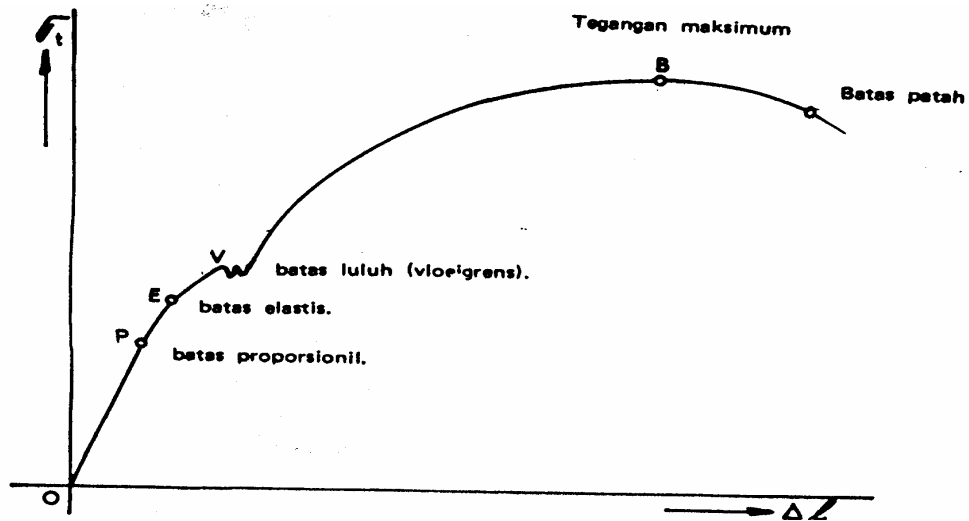
relatif besar, jika dibandingkan dengan bertambahnya tegangan -tarik, seakan-akan baja menjadi sangat lunak sekali. Setelah melampaui batas luluh ini, baja mendapat keteguhan lagi. Akhirnya baja tersebut mencapai batas patah.

**D. Kekerasan bahan**

Hal yang sangat penting untuk mengetahui apakah bahan itu dapat dipakai untuk suatu keperluan, adalah menentukan kekerasannya. Salah satu cara untuk menentukan kekerasan bahan , yang disebut cara Brinel, adalah sebagai berikut :

Sebuah bola baja  $\frac{1}{16}$ " yang disepuh ditekankan pada bahan percobaan,

selama 15 detik dengan gaya P, Garis tengah lekukan karena tekanan tadi diukur dengan sangat teliti kemudian ditentukan luasnya. Anggaplh luas itu besarnya q, maka hasil bagi dari P dan q itu adalah kekerasan bahan tersebut.

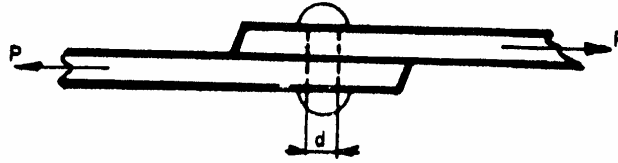


Gambar 1.3 Sifat kekerasan bahan

**E. Tegangan geser**

Putus geser yang murni di dalam praktek tidak mungkin terdapat, tetapi untuk memudahkan perhitungan, pada umumnya dianggap bahwa hal itu ada. Misalkan sebuah penampang normal yang mempunyai luas q, menerima beban sebesar P,

maka jika beban P itu terbagi rata dan teratur pada penampang tersebut. Tegangan ini kita sebut tegangan-geser, dan biasanya diberi tanda  $\tau$  (baca : tau). Jadi rumusnya dapat kita tulis :



Gambar 1.4 Diagram tegangan geser

Jika tegangan geser yang diizinkan (diizinkan) telah ditentukan, misalkan  $q = 800 \text{ kg/cm}^2$ , dan beban yang dipikul oleh blok  $P = 80 \text{ ton}$ , maka kita dapat menghitung berapa luas potongan-normal balok tersebut, sebagai berikut ;

Rumus

$P =$  besar beban dalam satuan kg.

$q =$  Luas potongan normal dalam satuan  $\text{cm}^2$ .

$\tau =$  tegangan-geser yang diizinkan dalam satuan  $\text{kg/cm}^2$ .

#### F. Momen lengkung.

Beban yang dialami oleh bahan bangunan dapat juga berupa momen-lengkung. Misalnya pada gambar 1-5, sebuah balok ada ujungnya dijepit pada tembok dan pada ujung lainnya bekerja beban P, maka penampang normal pada A mengalami beban momen-lengkung sebesar  $P \times l$  kgm.  $l =$  panjang-balok dalam satuan meter. Pada beban seperti ini serat bagian atas balok mengalami tegangan-tarik. sedang serat-serat bagian bawah balok mengalami tegangan-tekan. Pada beban seperti inipun bahan balok dapat patah bila besarnya P melampaui batas kekuatan balok. Untuk menjaga jangan sampai serat yang atas dibebani lebih dari tegangan-tarik yang diizinkan dan serat bagian bawah tidak dibebani tegangan-tekan yang diizinkan, maka perludi adakan perhitungan dengan formulasi khusus.

## **G. RANGKUMAN 1**

Bahan listrik dalam sistem tenaga listrik merupakan salah satu elemen penting yang akan menentukan kualitas penyaluran energi listrik itu sendiri. Bahan listrik yang sangat populer selama ini meliputi konduktor, semi konduktor dan isolator. Satu lagi yang dikenal dengan super konduktor, namun masih dalam penelitian intensif para ahli. Ketiga bahan tadi secara integratif dalam system kelistrikan dimanfaatkan secara optimal. Seperti misalnya konduktor adalah salah material paling besar yang dipakai dalam penyaluran tenaga listrik baik aluminium maupun tembaga atau campuran dengan bahan lain. Demikian pula isolator dipakai banyak sekali untuk menyekat bagian bagian bertegangan dengan bagian yang kontak langsung dengan manusia. Dalam teknik listrik, khususnya pada pelajaran praktek, mempelajari dan memahami bermacam-macam bahan beserta sifat-sifatnya merupakan hal yang sangat penting, guna memilih suatu bahan penyekat misalnya, bahan tadi perlu disesuaikan dengan penggunaannya, umpamanya penyekat harus memiliki sifat-sifat tahanan jenis yang besar, tahan terhadap lembab, panas, reaksi bahan kimia dan sebagainya. Selain sifat, bahan juga mempunyai bermacam-macam bentuk. Pada umumnya kita mengenal tiga macam bentuk, yaitu padat, cair, dan gas. Ada pula bahan-bahan yang memiliki ketiga bentuk tersebut pada suhu-suhu tertentu. Sebagai contoh dapat kita ambil air. Dalam keadaan biasa air berbentuk cair.

## **H. TUGAS KEGIATAN BELAJAR 1**

1. Jelaskan apa yang sdr. ketahui tentang bahan-bahan yang dipakai dalam teknik listrik !
2. Amati dengan seksama bahan konduktor apa yang banyak dipakai untuk penghantar !
3. Carilah literature tentang bahan listrik yang ada di perpustakaan yang berkaitan dengan konduktor, semi konduktor dan isolator !

**I. TES FORMATIF 1**

1. Jelaskan pengaruh temperatur terhadap perubahan sifat fisik dari benda padat !
2. Sebutkan beberapa karakteristik fisik dari benda padat apabila benda padat tersebut mendapat gaya dari luar !
3. Salah satu sifat dari benda padat adalah proses pemuaian. Jelaskan faktor-faktor yang berpengaruh pemuaian tersebut !
4. Jelaskan istilah-istilah benda berikut :
  - a. batas proporsional
  - b. batas elastis

**J. KUNCI JAWABAN FORMATIF 1**

1. Salah satu sifat benda padat adalah memuai apabila temperatur naik hal ini ditunjukkan dengan formulasi :

$$V_{t_2} = V_{t_1} (1 + \alpha (t_2 - t_1))$$

demikian juga untuk kondisi panjang dan luas.

2. bentuk benda akan kembali semula, sebagian kembali bentuk semula dan benda berubah sama sekali.
3. factor yang berpengaruh : gaya tarik, panjang mula-mula, luas penampang, dan jenis bahan
4. a. batas garis lurus pada grafik dari kondisi bahan awal  
b. batas dimana bahan mempunyai kemampuan untuk kembali ke semula.

**K. LEMBAR KERJA 1**

Untuk melakukan pengayaan substansi materi yang telah disajikan, maka peserta diklat wajib melakukan tugas terstruktur yakni melakukan praktek di lab. dan survey lapangan terhadap industri terkait. Untuk itu peserta didik setelah tuntas dengan modul diharapkan langsung cek in industridan mengisi form berikut :

No	Uraian Kegiatan	Kompetensi/Subkompetensi yg akan dicapai	Tempat	Pembimbing Lapangan

## KEGIATAN BELAJAR 2

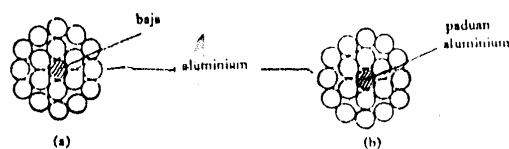
### BAHAN PENGHANTAR LISTRIK

Fungsi penghantar pada teknik listrik adalah untuk menyalurkan energi listrik dari satu ke titik lain. Penghantar yang lazim digunakan antara lain : aluminium, tembaga. Namun demikian, pada bab ini disampaikan pula beberapa bahan yang masih ada relevansinya. Sifat dan karakteristik bahan penghantar yang dibahas lebih bersifat umum tidak mengarah lebih spesifik pada ilmu bahan. Hal ini disesuaikan dengan aplikasi dilapangan yang lebih mengarah pada pada kenaikan temperatur dan sifat jenis bahan tersebut.

#### A. ALUMINIUM

Aluminium murni mempunyai massa jenis  $2,7 \text{ g/ cm}^3$ ,  $\rho$  nya  $1,4 \cdot 10^5$ , titik leleh  $658^{\circ} \text{ C}$  dan titik korosif. Daya hantar aluminium sebesar  $35 \text{ m/ ohm} \cdot \text{mm}^2$  atau kira-kira 61,4 % daya hantar tembaga.

Aluminium murni mudah dibentuk karena lunak, kekuatan tariknya hanya  $9 \text{ kg/ mm}^2$ . Untuk itu jika aluminium digunakan sebagai penghantar yang dimensinya cukup besar, selalu diperkuat dengan baja atau paduan aluminium. Penggunaan yang demikian misalnya pada : ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced), ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced). Konstruksi penghantar-penghantar dari aluminium seperti terlihat pada Gb. 3.1.



Gambar 2.1 Konstruksi penghantar aluminium

Penggunaan aluminium yang lain adalah untuk busbar dan karena alasan tertentu misalnya, karena alasan ekonomi, dibuat penghantar aluminium yang berisolasi, misalnya : ACSR-OW. Menurut ASA (American Standard Association), paduan aluminium diberi penandaan seperti ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1  
Penandaan Paduan Aluminium

B a h a n	Penandaan
Aluminium, kemurnian minimum 99 %	1 xxx
Paduan yang mayoritas terdiri dari :	
☞ Tembaga	2 xxx
☞ Mangan	3 xxx
☞ Silikon	4 xxx
☞ Magnesium	5 xxx
☞ Magnesium dan silikon	6 xxx
☞ Seng	7 xxx
☞ Lain-lain	8 xxx
☞ Seri-seri yang tak digunakan	9 xxx

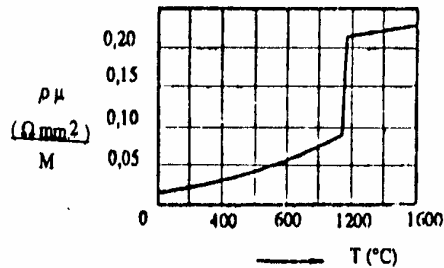
Contoh :

1. Penandaan 1045 untuk aluminium tempa, berarti :
  - a. 1 xxx menunjukkan kemurnian aluminium 99 %
  - b. x 0 xx tidak ada pemeriksaan terhadap sisa pengotoran 1 % - 0,45 % = 0,55 %.
  - c. xx 45 menunjukkan 99,45 % bahan tersebut terbuat dari aluminium.
- Penandaan 6050 untuk aluminium tempa, berarti :
  - a. 6 xxx menunjukkan aluminium dengan campuran mayoritas Si dan S i
  - b. x 0xx tidak ada pemeriksaan terhadap pengotoran 1 % - 0,5 % = 0,5 %
  - c. xx45 menunjukkan bahan tersebut terbuat dari paduan magnesium dan silikon 99,5 %.



## B. TEMBAGA

Tembaga mempunyai daya hantar listrik yang tinggi yaitu  $57 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  pada suhu  $20^\circ \text{C}$ . Koefisien suhu ( $\alpha$ ) tembaga  $0,004 \text{ per}^\circ \text{C}$ . Kurva resistivitas tembaga terhadap suhu adalah tidak linier seperti ditunjukkan pada Gb.2.2.

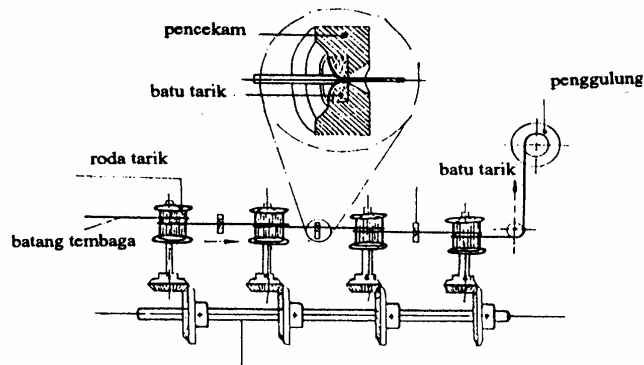


Gambar 2.2 Kurva resistivitas tembaga

Pemakaian tembaga pada teknik listrik yang terpenting adalah sebagai penghantar, misalnya : kawat berisolasi (NYA, NYAF), kabel (NYM, NYY, NYFGBY), busbar, lamel mesin dc, cincin seret pada mesin ac.

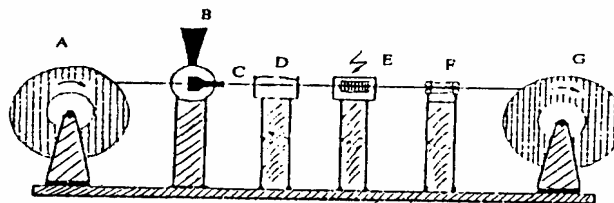
Tembaga mempunyai ketahanan terhadap korosi, oksidasi. Massa jenis tembaga murni pada  $20^\circ \text{C}$  adalah  $8,96 \text{ g/cm}^3$ , titik beku  $1083^\circ \text{C}$ . Kekuatan tarik tembaga tidak tinggi yaitu berkisar antara 20 hingga  $40 \text{ kg/mm}^2$ , kekuatan tarik batang tembaga akan naik setelah batang tembaga diperkecil penampangnya untuk dijadikan kawat berisolasi atau kabel.

Cara memperkecil penampang batang tembaga menjadi kawat dengan menggunakan penarik tembaga seperti ditunjukkan pada Gb. 2.3. Untuk memperkecil penampang tembaga digunakan batu tarik (die) yang besarnya beragam, makin ke ujung adalah makin kecil penampang rautannya. Makin kecil penampang kawat diperlukan, makin banyak tahapan batu tarik yang digunakan. Bahan batu tarik untuk pembuatan kawat yang cukup besar diameternya kecil adalah intan. Selama penarikan akan terjadi penambahan panjang. Untuk itu roda tarik yang dipasang dibelakang batu tarik putarannya atau diameternya dibuat lebih besar.



Gambar 2.3 Penarikan batang tembaga menjadi kawat

Sesudah diadakan penarikan terhadap batang tembaga menjadi kawat, tembaga akan lebih lenting. Keadaan ini kurang baik digunakan sebagai kawat berisolasi atau kabel. Agar tembaga menjadi lunak kembali, perlu diadakan pemanasan. Namun harus diusahakan hendaknya selama proses pemanasan tersebut tidak terjadi oksidasi. Setelah proses pemanasan selesai, maka proses pembuatan kawat berisolasi atau kabel dapat dimulai. Untuk penghantar yang penampangnya lebih kecil dari  $16 \text{ mm}^2$  digunakan penghantar pegal, sedangkan untuk penghantar yang penampangnya  $> 16 \text{ mm}^2$  digunakan penghantar serabut yang dipilin. Pemberian isolasi pada kawat berisolasi seperti ditunjukkan pada gambar 2.4. Kawat dari gulungan A ditarik melalui alat ekstrusi B detailnya dapat dilihat pada Gb. 2.3 pada alat ini pvc diberikan dengan pengarah C. Selanjutnya pvc yang keluar dari C didinginkan pada bak pendingin D. Keluar dari D, kawat yang sudah terisolasi diuji dengan pengujian cetusan (spark testing) E, ditarik dengan penarik F dan selanjutnya digulung dengan penggulung G.



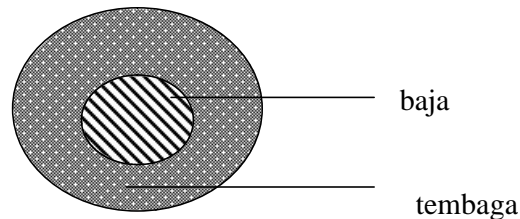
Gambar 2.4 Pemberian isolasi untuk kawat.

### C. BAJA

Baja merupakan logam yang terbuat dari besi dengan campuran karbon. Berdasarkan campuran karbonnya, baja dikategorikan menjadi 3 yaitu : baja dengan kadar karbon rendah (0 hingga 0,25 %), baja dengan kadar karbon menengah (0,25 hingga 0,55 %), baja dengan kadar karbon tinggi (di atas 0,55 %).

Meskipun konduktivitas baja rendah yaitu :  $7,7 \frac{\text{m}}{\text{mm}^2}$  tetapi digunakan pada

penghantar transmisi yaitu ACSR, fungsi baja dalam hal ini adalah untuk memperkuat konduktor aluminium secara mekanis setelah digalvanis dengan seng. Keuntungan dipakainya baja pada ACSR adalah menghemat pemakaian aluminium. Berdasarkan pertimbangan tersebut dibuat penghantar bimetal seperti ditunjukkan pada Gb. 2.5 (jangan dikacaukan dengan termal bimetal yang biasanya untuk pengaman).



Gambar 2.5 Penampang kawat Bimetal

Dua hal yang menguntungkan dari penghantar bimetal, yaitu :

- Pada arus bolak balik ada kecenderungan arus melalui bagian luar konduktor (efek kulit).
- Dengan melapisi baja menggunakan tembaga, maka baja sebagai penguat penghantar terhindar dari korosi.

Pemakaian penghantar bimetal selain untuk kawat penghantar adalah untuk : busbar, pisau hubung.

### D. WOLFRAM

Logam ini berwarna abu-abu keputih-putihan, mempunyai massa jenis  $20 \text{ g/cm}^3$ , titik leleh  $3410^{\circ} \text{ C}$ , titik didih  $5900^{\circ} \text{ C}$ ,  $4,4 \cdot 10^{-6} \text{ per}^{\circ} \text{ C}$ , tahanan jenis  $0,055 \text{ } \cdot$

$\text{mm}^2/\text{m}$ . Wolfram diperoleh dari tambang yang pemisahannya dari penambangan dengan menggunakan magnetik atau proses kimia. Dengan reaksi reduksi asam wolfram ( $\text{H}_2\text{WO}_4$ ) dengan suhu  $700^\circ\text{C}$  diperoleh bubuk wolfram. Bubuk wolfram tersebut kemudian dibentuk menjadi batangan dengan suatu proses yang disebut metalurgi bubuk yang menggunakan tekanan dan suhu tinggi ( $2000$  atmosfer,  $1600^\circ\text{C}$ ) tanpa terjadi oksidasi. Dengan menggunakan mesin penarik, batang wolfram diameternya dapat dikecilkan menjadi  $0,01$  mm (penarikannya dilakukan pada keadaan panas). Penggunaan wolfram pada teknik listrik antara lain : filamen (lampu pijar, lampu halogen, lampu ganda), elektroda, tabung elektronik.

#### **E. MOLIBDENUM**

Logam ini mirip dengan wolfram dalam hal sifatnya, demikian pula cara mendapatkannya. Molibdenum mempunyai massa jenis  $10,2 \text{ g/cm}^3$ , titik leleh  $2620^\circ\text{C}$ , titik didih  $3700^\circ\text{C}$ ,  $\alpha 53.10^{-7}$  per  $^\circ\text{C}$ , resistivitasnya  $0,048 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  koefisien suhu  $0,0047$  per  $^\circ\text{C}$ . Diantara penggunaan Molibdenum adalah pada : tabung sinar X, tabung hampa udara, karena molibdenum dapat membentuk lapisan yang kuat dengan gelas. Sebagai campuran logam yang digunakan untuk keperluan yang keras, tahan korosi, bagian-bagian yang digunakan pada suhu tinggi.

#### **F. PLATINA**

Platina merupakan logam yang berat, berwarna putih keabu-abuan, tidak korosif, sulit terjadi peleburan dan tahan terhadap sebagian besar bahan kimia. Massa jenisnya  $21,4 \text{ g.cm}^3$ ,  $\alpha 9.10^{-6}$  per  $^\circ\text{C}$ , titik leleh  $1775^\circ\text{C}$ , titik didih  $4530^\circ\text{C}$ , resistivitasnya  $0,1 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ , koefisien suhu  $0,00307$  per  $^\circ\text{C}$ .

Platina dapat dibentuk menjadi filamen yang tipis dan batang yang tipis-tipis. Penggunaan platina pada teknik listrik antara lain untuk elemen pemanas pada laboratorium tentang oven atau tungku pembakaran yang memerlukan suhu tinggi yaitu di atas  $13000^\circ\text{C}$ , untuk termokopel platina-rhodium (bekerja di atas  $16000^\circ\text{C}$ ), platina dengan diameter  $\alpha 1$  mikron digunakan untuk menggantung bagian gerak pada meter listrik dan instrumen sensitif lainnya, bahan untuk potensiometer.

Tabel 2  
Konstanta Bahan Penghantar

Bahan	Massa jenis g/cm <sup>3</sup>	$\rho_{0-100^{\circ}}$ $\times 10^{-6}$	Titik leleh	Titik didih panas	Konduktivitas	Kekuatan tarik
Aluminium	2,7	23,86	659,7	2447	0,57	20-30
Baja	7,7	10,5 – 13,2	1170-1530	-	0,11	37-64
Tembaga	8.96	16,86	1083	2595	0,944	40
Air Raksa	13,55	61	-38,86	356,73	0,02	-
Molibdenum	10,22	54	2620	4800	0,33	100-25-
Wolfram	19,27	2,5	3390	5500	0,31	420
Platina	21,5	9,09	1769	4300	0,17	34

### G. AIR RAKSA

Air raksa adalah satu-satunya logam yang berbentuk cair pada suhu kamar. Resistivitasnya adalah  $0,95 \times 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ , koefisien suhu  $0,00027 \text{ per}^{\circ} \text{C}$ . Pada pemanasan di udara air raksa sangat mudah terjadi oksidasi. Air raksa dan campurannya khususnya uap air raksa adalah beracun. Penggunaan air raksa antara lain : gas pengisi tabung-tabung elektronik, penghubung pada saklar air raksa, cairan pada pompa difusi, elektroda pada instrumen untuk mengukur sifat listrik bahan dielektrik padat.

Logam-logam lain yang juga banyak digunakan pada teknik listrik diantaranya adalah : tantalum dan niobium. Tantalum dan niobium dipadukan dengan aluminium banyak digunakan sebagai kapasitor elektrolitik.

### H. BAHAN-BAHAN RESISTIVITAS TINGGI

Bahan-bahan resistivitas tinggi yang digunakan untuk peralatan yang memerlukan resistansi yang besar agar bila dialiri arus akan terjadi tegangan anjlok yang besar. Contoh penggunaan bahan-bahan resistivitas tinggi antara lain pada pemanas listrik, rheostat dan resistor. Bahan-bahan ini harus mempunyai koefisien suhu yang rendah. Untuk elemen pemanas, pada suhu yang tinggi untuk waktu yang lama tidak boleh terjadi oksidasi dan meleleh. Bahan-bahan yang resistivitasnya tinggi

antara lain : konstanta, manganin, nikrom dan fehral yang komposisinya ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3  
Bahan Resistivitas Tinggi

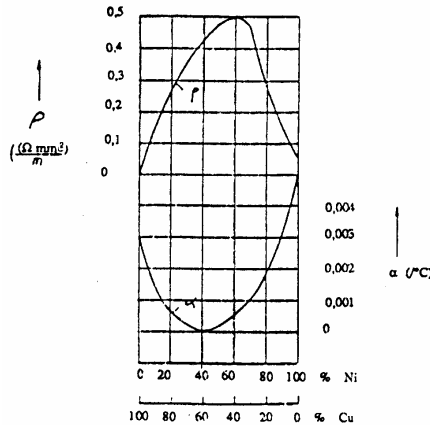
Nama Paduan	Komposisi (%)	Massa jenis	Resistivitas $\rho$ . mm <sup>2</sup> /m	Koeffisien suhu $\alpha$ 10 <sup>5</sup> / <sup>0</sup> C
Konstanta	60 Cu.40Ni	8,9	0,48.052	5,25
Kromel	0,7Mn, 0,6 Ni, 23 s/d 27 Cr, 4,5 s/d 6,5 Al + Fe	6,9 s/d 7,3	1,3 s/d 1,5	6,5
Manganin	86 Cu, 12 Mn, 2 Ni	84	0,42 s/d 0,48	5,3
Nikrom	1,5 Mn, 75 s/d 78 Ni, 20 s/d 23 Cr sisanya Fe	8,4 s/d 8,5	1 s/d 1,1	10 s/d 20
Fechral	0,7 Mn, 0,6 Ni, 12 s/d 1,5 Cr 3,5 s/d 5 Al, sisanya Fe	7,1 s/d 7,5	1,2 s/d 1,35	10 s/d 12
Nikelin	54 Cu, 26 Ni, 20 Zn	-	0,4 s/d 0,47	23

## I. KONSTANTAN

Konstantan merupakan logam paduan dari tembaga dan nikel seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Hubungan antara resistivitas, koeffisien suhu ( $\alpha$ ) dan komposisi antara tembaga dan nikel ditunjukkan Gb. 2.6. Dari Gb.2.6 terlihat bahwa resistivitas tertinggi adalah pada perbandingan 60 % Ni dengan 40 % Cu, tetapi koeffisien suhu terendah adalah 40 % Ni dengan 60 % Cu. Sebagai bahan elemen resistansi tinggi, misalnya rheostat, elemen pemanas dengan suhu kerja 400<sup>0</sup> hingga 500<sup>0</sup> C di buat komposisi 60 % Ni dengan 40 % Cu, yaitu Konstantan. Bersama-sama dengan tembaga atau besi, konstantan dapat merupakan termokopel yang dapat membangkitkan emf  $\alpha$  40 mikro volt setiap perbedaan suhu 1<sup>0</sup> C diantara sambungan-sambungannya. Hal ini memungkinkan termokopel konstantan tembaga atau konstantan besi digunakan alat ukur. Jika dipanasi dengan suhu yang cukup tinggi, pada konstantan akan terbentuk lapisan oksida tipis dan ini memungkinkan terjadinya isolasi jika dililitkan. Tegangan tembus untuk isolasi tersebut tidak lebih dari 1 volt.

**J. KROMEL**

Logam ini merupakan perpaduan 0,7 % Mn, 0,6 % Ni, 23 sampai 27 % Cr dengan 4,5 hingga 6,7 % Al, sisanya Fe. Kromel baik untuk elemen pemanas air, setrika, pemanggang dan peralatan yang memerlukan ketahanan korosi dan panas.



Gambar. 2.6  $\rho$  dan  $\alpha = f(\% \text{ Ni} + \text{ Cu})$

**K. MANGANIN**

Warna logam ini kuning kemerah-merahan, komposisi manganin dapat dilihat pada tabel 3. Suhu kerjanya  $\approx 70^{\circ} \text{ C}$

Tabel 4

Jenis	Kekerasan (vickres)	Resistivitas $10^{-3} \rho \cdot \text{cm}$	Rugi Kontak	Aplikasi
Karbon resistivitas tinggi	-	5 hingga 30	Tinggi	Motor kecil, daya < 1 HP
Karbon resistivitas rendah	30	4	Rendah	Crame
Elektrografit	15	4	Sedang	Mesin dc
Elektrografit				
Kecepatan tinggi	15	6	Sedang	Generator Turbo
Grafit tembaga	10 s.d 20	0,5 s.d 0,003	Rendah	Mesin ac & dc

**L. TIMAH HITAM**

Timah hitam mempunyai massa jenis  $11,4 \text{ g/cm}^3$ , agak lunak, meleleh pada suhu  $327^{\circ} \text{ C}$ , titik didih  $1560^{\circ} \text{ C}$ , warna abu-abu dan sangat mudah dibentuk. Merupakan

bahan tahan korosi dan mempunyai konduktivitas  $4,5 \text{ m} / \Omega \cdot \text{mm}^2$ . Pemakaian timah hitam pada teknik listrik antara lain : sel-akumulator, selubung kabel tanah disamping digunakan sebagai pelindung pada industri nuklir. Timah hitam tidak tahan terhadap pengaruh getaran dan mudah mengikat sisa asam. Untuk itu pemakaiannya sebagai pelindung kabel tanah jika ditanam pada tempat-tempat tersebut, diperlukan perlindungan tambahan. Kapur basah, air laut dan semen basah dapat bereaksi dengan timah hitam. Itulah sebabnya disamping timah hitam sebagai pelindung kabel tanah, digunakan paduan dari timah hitam yang mempunyai struktur kristal yang lebih halus, lebih kuat, lebih tahan getaran. Tetapi lebih mudah korosi. Timah dan komponennya mengandung racun.

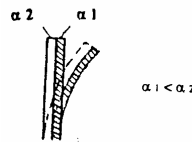
### M. BIMETAL

Setiap logam mempunyai muai panjang  $\alpha$  yang berbeda. Hal ini berarti bila 2 buah logam dengan  $\alpha$  berbeda dipanasi dengan suhu yang sama panjangnya akan menjadi berbeda. Apabila keduanya disatukan menjadi bimetal seperti ditunjukkan pada Gb. 2.7, apabila dipanasi bimetal akan melengkung ke arah logam yang mempunyai  $\alpha$  lebih kecil.

Besarnya lengkungan (penyimpangan)  $a$  ditentukan oleh perbedaan muai panjang ( $\alpha_2 - \alpha_1$ ), panjang  $l$ , beda suhu ( $t_2 - t_1$ ) dan ketebalan  $h$  dari kedua logam.

Penyimpangan maksimum bimetal adalah :

$$a = \frac{3}{4} \frac{(\alpha_2 - \alpha_1) l^2 (t_2 - t_1)}{h}$$



Gambar. 2.7 Penyimpang bimetal karena  $\alpha_1 < \alpha_2$

Bahan yang umum digunakan untuk bimetal adalah invar (63,1 % Fe + 36,1 % Ni + 0,4 % Mn + 0,4 % Cu) sebagai logam yang mempunyai  $\alpha$  kecil yaitu  $1,5 \cdot 10^{-6}$  per  $^{\circ}\text{C}$  untuk suhu 0 hingga  $100^{\circ}\text{C}$ .



## **N. RANGKUMAN 2**

Fungsi penghantar pada teknik listrik adalah untuk menyalurkan energi listrik dari satu ke titik lain. Penghantar yang lazim digunakan antara lain : aluminium, tembaga. Namun demikian, pada bab ini disampaikan pula beberapa bahan yang masih ada relevansinya. Sifat dan karakteristik bahan penghantar yang dibahas lebih bersifat umum tidak mengarah lebih spesifik pada ilmu bahan. Hal ini disesuaikan dengan aplikasi dilapangan yang lebih mengarah pada kenaikan temperatur dan sifat jenis bahan tersebut. Sebagian penghantar dibawah ini yang akan dibahas :

- a. Aluminium
- b. Tembaga
- c. Baja
- d. Wolfram

## **O. TUGAS KEGIATAN BELAJAR 2**

1. Jelaskan secara singkat pemakaian aluminium dan tembaga dalam penghantar sistem tenaga listrik !
2. Telaah dari beberapa literature secara teknis dan ekonomis bahan penghantar yang paling efisien !
3. Jelaskan pengaruh resistensi dan konduktansi terhadap penyaluran energi listrik !

## **P. TES FORMATIF 2**

1. Jelaskan kelebihan aluminium sebagai penghantar yang baik berdasarkan sifat fisis, resistivitas dan konduktansi !
2. Jelaskan apa yang sdr. ketahui tentang penghantar ACSR !
3. Terangkan pemakaian kawat tembaga untuk instalasi penerangan di rumah tinggal !
4. Jelaskan aplikasi bahan penghantar berikut :
  - a. wolfram
  - b. baja
  - c. Platina

**Q. KUNCI JAWABAN FORMATIF**

1. Alumunium salah satu bahan yang mempunyai daya hantar tinggi, titik leleh tinggi serta tidak korosif. Dengan sifat fisik tersebut maka alumunium sangat efektif sebagai penghantar. Kelemahannya hanya kapasitas tarik mekanik alumunium rendah.
2. ACSR adalah salah penghantar yang banyak dipakai untuk tegangan tinggi yang terbentuk dari alumunium dan diperkuat baja.
3. Penghantar tembaga banyak dimanfaatkan untuk instalasi penerangan dengan pertimbangan aspek ekonomis dan daya hantarnya. Seperti NYM, NYY, NYFGbY, NYA, NYAF
4. a. Kawat wolfram merupakan bahan listrik tahan panas tinggi dengan tahanan jenis cukup besar. Banyak dipakai untuk filamen lampu pijar, elektroda dan tabung elektronik  
b. baja merupakan bahan yang memiliki kekuatan mekanik tinggi walaupun daya hantar rendah tapi tetap dipakai sebagai penghantar memperkuat alumunium. Al dibagian luar dan baja di bagian dalam, karena ada 'skin effect' maka cenderung arus mengalir di bagian luar pada alumunium.  
c. Platina termasuk kategori logam berat tidak korosif dan mempunyai titik didih tinggi. Karena titik didih tinggi ini maka platina banyak dipakai untuk elemen pemanas pada tungku pembakaran dengan suhu tinggi  $1300^{\circ}$ .

**R. LEMBAR KERJA 3**

Untuk melakukan pengayaan substansi materi yang telah disajikan, maka peserta diklat wajib melakukan tugas terstruktur yakni melakukan praktek di lab. dan survey lapangan terhadap industri terkait. Untuk itu peserta didik setelah tuntas dengan modul diharapkan langsung cek in industridan mengisi form berikut :

No	Uraian Kegiatan	Kompetensi/Subkompetensi yg akan dicapai	Tempat	Pembimbing Lapangan

## KEGIATAN BELAJAR 3

### BAHAN ISOLASI

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

#### A. SIFAT KELISTRIKAN

Terdapat 3 hal pokok yang dibahas di dalam sub-bab ini yaitu resistivitas, permitivitas dan sudut kerugian dielektrik. Dari 3 hal tersebut akan memberikan gambaran sifat kelistrikan suatu bahan isolasi di samping sifat-sifat yang lain.

##### 1. Resistivitas

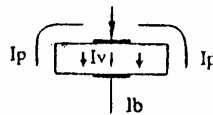
Sesuai dengan fungsinya, bahan isolasi yang baik adalah bahan isolasi yang resistivitasnya besar tak terhingga. Tetapi pada kenyataannya bahan yang demikian itu belum bisa diperoleh. Sampai saat ini semua bahan isolasi pada teknik listrik masih mengalirkan arus listrik (walaupun kecil) yang lazim disebut arus bocor. Hal ini menunjukkan bahwa resistansi bahan isolasi bukan tidak terbatas besarnya. Besarnya resistansi bahan isolasi sesuai dengan Hukum Ohm adalah

$$R_i = v / I_b$$

- $R_i$  = resistansi isolasi (ohm)  
 $V$  = tegangan yang digunakan (volt)  
 $I_b$  = arus bocor (ampere)

Kalau diperhatikan lebih jauh, terdapat 2 macam resistansi yaitu resistansi volume ( $R_v$ ) dan resistansi permukaan ( $R_p$ ).

Resistansi volume mengakibatkan mengalirnya arus bocor  $I_v$ , sedangkan resistansi permukaan menyebabkan mengalirnya arus bocor  $I_p$ , seperti ditunjukkan pada Gb. 3.1.



Gambar 3.1 Arus bocor  $I_v$  dan  $I_p$  pada bahan isolasi

Seperti terlihat pada Gb.3.1  $R_v$  dan  $R_p$  adalah paralel. Sehingga berdasarkan Hukum Kirchoff 1 :

$$I_b = I_v + I_p$$

$$\text{Dan } 1/R_i = 1/R_v + 1/R_p$$

$$R_i = (R_v \cdot R_p) / (R_v + R_p)$$

Resistivitas volume pada umumnya disebut resistivitas saja. Besarnya resistivitas volume adalah

$$R_v = \rho_v l / S$$

$\rho_v$  - adalah resistivitas volume dengan (ohm - meter)

$l$  - adalah panjang bagian yang dilewati arus (m)

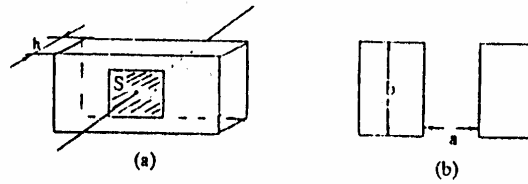
$S$  - adalah luas penampang ( $m^2$ )

Besarnya resistivitas permukaan di antara 2 bidang selebar  $b$  pada jarak  $a$  adalah :

$$R_p = \rho_s (a / b)$$

$\rho_s$  adalah resistivitas permukaan dengan satuan ohm.

Definisi dari resistivitas permukaan  $\rho_s$  adalah resistansi pada permukaan persegi suatu bahan waktu arus mengalir di sisi lain dari penampang tersebut.



Gambar 3.2 Ilustrasi perhitungan resistansi

Beberapa hal yang harus diperhatikan sehubungan dengan resistivitas adalah :

- Resistivitas volume maupun resistivitas permukaan akan berkurang/besarnya jika suhu dinaikkan. Banyak bahan yang mempunyai  $\rho_v$  dan  $\rho_p$  yang bc--s.ar pada suhu kamar, tetapi, turun drastis pada suhu 1000 C.
- Untuk bahan isolasi yang higroskopis, di daerah-daerah yang lembab resistivitasnya akan turun secara mencolok.
- Resistivitas akan turun jika tegangan yang diberikan naik

Dari 3 hal tersebut diatas, maka pada pemakaian sehari-hari dalam pemakaian bahan isolasi misalnya untuk daerah kerja yang suhunya tinggi atau lembab, harus dipilih bahan yang sesuai baik bahan maupun tegangan kerjanya.

## 2. Permittivitas

Setiap bahan isolasi mempunyai permitivitas. Hal ini bagi bahan-bahan yang digunakan sebagai elektrik kapasitor. Kapasitansi suatu kapasitor tergantung beberapa faktor yaitu : luas permukaan, jarak antara keping-keping kapasitor serta dielektriknya.

Besarnya kapasitansi C (farad) dapat dihitung dengan :

$$C = \frac{10^{29} \epsilon S}{36 \pi h}$$

$\epsilon$  adalah permitivitas bahan elektrik (F/m)

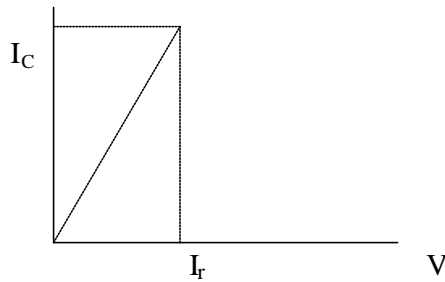
h adalah jarak keping-keping kapasitor (m)

S adalah luas permukaan keping-keping kapasitor (m<sup>2</sup>)

Besarnya permitivitas udara hampir 1 yaitu 1.000.589, sedangkan besarnya permitivitas untuk zat padat dan zat cair selalu lebih besar dari 1.

### 3. Sudut Kerugian Dielektrik

Pada saat bahan isolasi diberi tegangan bolak balik, maka terdapat energi yang diserap oleh bahan tersebut. Akibatnya terdapat faktor kapasitif. Hubungan vektoris antara tegangan dan arus pada bahan isolasi adalah seperti ditunjukkan pada Gb. 3.3. Besarnya kerugian yang diserap bahan isolasi adalah berbanding lurus dengan tegangan  $V$  volt, frekuensi  $f$  hertz, kapasitansi  $C$  farad, dan sudut kerugian dielektrik  $\theta$ , seperti ditunjukkan pada persamaan berikut.



Gambar 3.3 Hubungan  $I_C = f(I_r)$

$$P = V \cdot 2\theta \cdot f \cdot C \cdot \tan \theta$$

Sehingga

$$\tan \theta = \frac{P}{V^2 2\pi f C}$$

Dari persamaan di atas terlihat bahwa makin besar tegangan, frekuensi dan kapasitansi untuk kerugian yang sama, maka makin kecil harga  $\tan \theta$  atau makin kecil sudut antara arus kapasitif  $I_C$  dengan arus total  $I$  dan makin besar sudut antara arus resistif  $I_r$  dengan arus total  $I$ .

### 4. Sifat terhadap Panas

Pada penghantar yang dilewati arus listrik selalu terjadi kerugian daya. Kerugian daya ini selanjutnya didisipasikan dalam bentuk energi panas. Untuk itu perlu dipelajari pengaruh panas terhadap bahan-bahan isolasi karena panas dapat mempengaruhi bahan isolasi dalam hal : sifat kelistrikan, kekuatan

mekanis, kekerasan, viskositas, ketahanan terhadap pengaruh kimia dan sebagainya. Suatu bahan isolasi dapat rusak disebabkan oleh panas dalam kurun waktu tertentu. Waktu tersebut dikatakan sebagai umur panas bahan isolasi. Sedangkan kemampuan bahan menahan suatu panas tanpa terjadi kerusakan disebut ketahanan panas (*heat resistance*). Klasifikasi bahan isolasi menurut IEC (*International Electrotechnical Commission*) didasarkan atas batas suhu kerja bahan.

## **5. Sifat Fisis dan Kimia**

Beberapa sifat fisis dan kimia yang akan dibahas di sini adalah; sifat kemampuan larut, resistansi kimia, higroskopisitas, permeabilitas uap, pengaruh tropis dan resistansi radio aktif.

### ***a. Sifat kemampuan Larut***

Sifat ini adalah diperlukan ketika menentukan macam bahan pelarut untuk suatu bahan, misalnya : vernis, plastik, dan sebagainya. Juga ketika menguji bahan isolasi atas kemampuannya tetap tahan di dalam cairan selama diimpregnasi dan selama pemakaiannya (bahan isolasi trafo minyak). Kemampuan larut bahan padat dapat dievaluasi berdasarkan banyaknya bagian permukaan bahan yang dapat larut setiap satuan waktu jika diberi bahan pelarut. Kemampuan larut suatu bahan akan lebih besar jika suhunya dinaikkan. Umumnya bahan pelarut komposisi kimianya sama dengan bahan yang dilarutkan. Contohnya : hidro karbon (parafin, karet alam) dilarutkan dengan cairan hidro karbon atau phenol formaldehida.

### ***b. Resistansi Kimia***

Bahan isolasi mempunyai kemampuan yang berbeda ketahanannya terhadap korosi yang disebabkan oleh : gas, air, asam, basa dan garam. Hal ini perlu diperhatikan untuk pemakaian bahan isolasi yang digunakan di daerah yang konsentrasi kimianya aktif, suhu di atas normal. Karena kecepatan korosi dipengaruhi pula oleh kenaikan suhu. Bahan isolasi yang digunakan pada instalasi tegangan tinggi harus mampu menahan terjadinya ozon. Artinya, bahan tersebut harus mempunyai resistansi ozon yang tinggi. Karena ozon



dapat menyebabkan isolasi berubah menjadi regas. Pada prakteknya, bahan isolasi anorganik mempunyai ketahanan terhadap ozon yang baik.

**c. Higroskopisitas**

Beberapa bahan isolasi ternyata mempunyai sifat higroskopisitas, yaitu sifat menyerap air sekelilingnya. Uap air ternyata dapat mengakibatkan perubahan mekanis fisik (physico mechanical) dan memperkecil daya isolasi.

Untuk itu selama penyimpanan atau pemakaian bahan isolasi agar tidak terjadi penyerapan uap air oleh bahan isolasi, maka hendaknya bahan penyerap uap air yaitu senyawa  $P_2O_5$  atau  $CaCl_2$ . Bahan dielektrik yang melekulnya berisi kelompok hidroksil (OH), higroskopisitasnya relatif besar. Sedangkan bahan dielektrik seperti : parafin, polietilin dan politetra fluoro etilen adalah bahan-bahan nonhigroskopis.

**B. SIFAT-SIFAT MEKANIS**

Kekuatan mekanis bahan-bahan listrik maupun logam adalah kemampuan menahan beban dari dalam atau luar, pada prakteknya adalah beban tarik dan geser. Jika suatu bahan dengan penampang  $A \text{ cm}^2$  ditarik dengan suatu gaya tarik yang bertambah secara perlahan, maka bahan tersebut akan putus pada gaya tarik tertentu sebesar  $P_t \text{ kg}$ . Dalam hal ini stres atau tegangan tarik bahan  $\sigma_t$  adalah seperti ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$\sigma_t = \frac{P_t}{S}$$

Penambahan panjang bahan sebelum putus  $\Delta l$  dibagi dengan panjang mula-mula  $l$  disebut penambahan panjang relatif bahan atau strain  $\epsilon$  adalah :

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100 \%$$

Setelah titik Y penambahan panjang tanpa memerlukan penambahan gaya atau mungkin hanya kecil saja. Gejala ini terjadi sekitar 5 hingga 7 % dari panjang mula-mula  $l$ .

Titik Y disebut titik lumer (yield point) suatu bahan, sedangkan tegangan yang menjadikan bahan lumer disebut tegangan lumer (yield stress) yang besarnya adalah :

$$?y ? \frac{Py}{S}?$$

Py adalah gaya yang menyebabkan bahan menyerah (kg)

S adalah luas penampang mula-mula ( $m^2$ )

### 1. Pengujian derajat kekerasan

Pengujian derajat kekerasan dapat dilakukan dengan penggoresan atau penumbuhan dengan benda lancip terhadap bahan yang dapat mengalami deformasi plastis yaitu logam dan plastik. Derajat kekerasan suatu bahan perlu diperhatikan terutama untuk gawai yang bergesekan seperti : mata bor, komutator, bantalan. Pengujian derajat kekerasan untuk keramik dilakukan dengan penggoresan. Satuan derajat kekerasan bahan dengan penggoresan adalah Moh dengan intan sebagai bahan terkeras nilainya 10 dan kapur sebagai yang terlunak dengan nilai 1. Sedangkan untuk mengukur derajat kekerasan berdasarkan tumbukan digunakan metode-metode : Brinell, Rockwell dan Vickres. Pada cara pengujian dengan metode Brinell, sebuah bola baja dengan diameter 10 mm dan sudah diperkeras, ditekan ke permukaan bahan yang diuji dengan beban statis sehingga menimbulkan lekukan pada permukaan bahan yang diuji. Derajat kekerasan dapat dihitung dengan persamaan :

$$ke\ ker\ asan ? \frac{gaya\ yang\ diberikan\ (kg)}{Luas\ bidang\ lekukan\ (mm^2)}$$

Derajat kekerasannya dinyatakan dengan satuan Brinell ( $H_G$ ). Pada pengujian derajat kekerasan metode Vickres menggunakan intan yang berbentuk piramid. Pengujian dengan cara ini lebih menguntungkan dibanding dengan metode Brinell, karena pada intan tidak akan terjadi deformasi plastis. Untuk menentukan derajat kekerasannya digunakan persamaan di atas. Yang membedakan di sini, lekukannya tidak berbentuk bidang bola. Pada pengujian dengan metode Vickres satuannya adalah Vickres ( $H_D$ ).

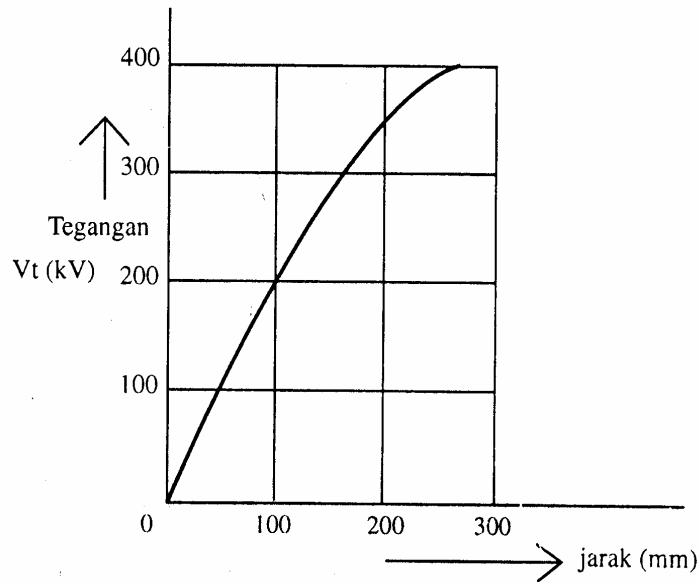
Pada pengujian kekerasan dengan metode Rockwell hasil pengujiannya dapat langsung terbaca pada alat pengujian. Sehingga pengujian dengan metode ini lebih mudah dan cepat. Mata penumbuk yang digunakan adalah intan berbentuk kerucut untuk bahan yang keras atau bola baja jika bahan yang diuji lunak.

### C. JENIS BAHAN ISOLASI

Bahan isolasi gas adalah digunakan sebagai pengisolasi dan sekaligus sebagai media penyalur panas. Bahan isolasi gas yang dibahas dalam bab ini adalah : udara, sulphur hexa fluorida ( $\text{SF}_6$ ) sebagai titik berat di damping gas-gas lain yang lazim digunakan di dalam teknik listrik.

#### 1. Udara

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 Gb.3.4.



Gambar 3.4  $V_t = f$  (celah udara) pada  $p = 1 \text{ atm}$ ,  $F = 50 \text{ Hz}$

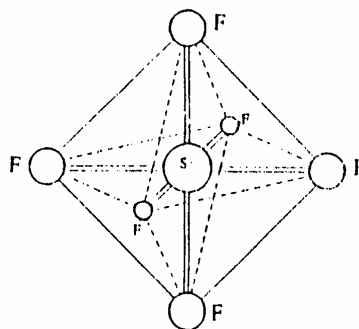
Kalau 2 buah elektroda yang dipisahkan dengan udara mempunyai beda tegangan yang cukup tinggi yaitu tegangan yang melebihi tegangan tembus, maka akan timbul loncatan bunga api. Bila tegangan tersebut dinaikkan lagi, maka akan terjadi busur api. Jika terdapat 2 buah elektroda berbentuk bulat dipisahkan dengan udara yang jaraknya cukup besar untuk suatu harga tegangan dan memungkinkan terjadinya ionisasi pada udara sekitarnya maka akan berbentuk ozon. Pada sekitar elektroda tersebut akan timbul sinar terang kebiru-biruan yang disebut korona. Besarnya tegangan tembus pada udara dipengaruhi oleh besarnya tekanan udara. Secara umum, makin besar tekanannya, makin besar pula tegangan tembusnya. Tetapi untuk keadaan pakem justru tegangan tembus akan menjadi lebih besar. Keadaan yang demikian inilah yang digunakan atau diterapkan pada beberapa peralatan listrik.

## 2. Sulphur Hexa Fluorida

Sulphur Hexa Fluorida ( $\text{SF}_6$ ) merupakan suatu gas bentukan antara unsur sulphur dengan fluor dengan reaksi eksotermis :



Molekul  $\text{SF}_6$  seperti ditunjukkan pada Gb. 3.5



Gambar. 3.5 Molekul sulphur hexa fluorida

Terlihat pada gambar 3.5 bahwa molekul  $\text{SF}_6$  mempunyai 6 atom Fluor yang mengelilingi sebuah atom Sulphur, di sini masing-masing atom Fluo mengikat 1

buah elektron terluar atom Sulphur. Dengan demikian maka SF<sub>6</sub> menjadi gas yang inert atau stabil seperti halnya gas mulia. Sampai saat ini SF<sub>6</sub> merupakan gas terberat yang mempunyai massa jenis 6,139 kg/m<sup>3</sup> yaitu sekitar 5 kali berat udara pada suhu 0<sup>0</sup> celsius dan tekanan 1 atmosfer. Sifat lainnya adalah : tidak terbakar, tidak larut pada air, tidak beracun, tidak berwarna dan tidak berbau.

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 : 1.

Tabel 1  
Sifat beberapa Gas

Gas	Massa jenis kg/m <sup>3</sup>	Konduktivitas panas W/ . m	Tegangan Tembus kV/ cm
Udara	1,228	5 . 10 <sup>-6</sup>	30
	6,139	1,9 . 10 <sup>-5</sup>	75
Nitrogen (N <sub>2</sub> )	1,191	5,4 . 10 <sup>-6</sup>	30
Karbon dioksida	1,867	3,2 . 10 <sup>-6</sup>	27
Hidrogen	0,086	3,3 . 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 SF<sub>6</sub> sebagai media pemadam busur api dan relevansinya pada sakelar pemutus beban adalah :

- a. Hanya memerlukan energi yang rendah untuk mengoperasikan mekanismenya. Pada prinsipnya SF<sub>6</sub> sebagai pemadam busur api adalah tanpa memerlukan energi untuk mengkompresikannya, namun semata-mata karena pengaruh panas busur api yang terjadi.

- b. Tekanan SF<sub>6</sub> 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 unsur pembentuknya)
- d. Relatif mudah terionisasi sehingga plasmanya pada CB konduktivitasnya tetap rendah dibandingkan pada keadaan dingin. Hal ini mengurangi kemungkinan busur api tidak stabil dengan demikian ada pemotongan arus dan menimbulkan tegangan antar kontak.
- e. Karakteristik gas SF<sub>6</sub> 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.

#### **D. BAHAN ISOLASI CAIR**

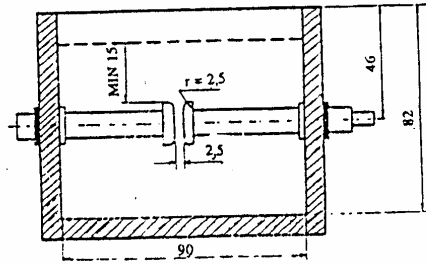
Bahan isolasi cair digunakan sebagai bahan pengisi pada beberapa peralatan listrik, misalnya : transformator, pemutus beban, rheostat. Dalam hal ini bahan isolasi cair berfungsi sebagai pengisolasi dan sekaligus sebagai pendingin. Karena itu persyaratan untuk bahan cair yang dapat digunakan untuk isolasi antara lain : mempunyai tegangan tembus dan daya hantar panas yang tinggi.

##### **1. Minyak Transformator**

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. Pengujian tegangan tembus minyak transformator dapat dilakukan dengan menggunakan peralatan seperti ditunjukkan pada Gb. 3.6



Gambar 3.6 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 tembus nominal minyak transformator untuk tegangan kerja tertentu dapat dilihat pada tabel 2.

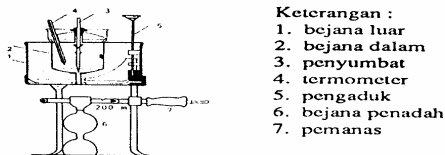
Tabel : 2

Tegangan tembus standar Minyak Transformator

Tegangan Kerja Peralatan	Tegangan Tembus (kV) untuk jarak 2,5 (cm)	
	Minyak Baru	Sedang Dipakai
Di atas 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.

Keasaman minyak transformator dapat dinetralsisir dengan menggunakan potas hidroksida (KOH). Sedangkan kandungan air di dalam minyak transformator dapat dihilangkan dengan memakai bahan higroskopis yaitu Silikagel. Agar minyak transformator berfungsi sebagai pendingin yang baik, maka kekentalannya tidak boleh terlalu tinggi agar mudah bersirkulasi di dalam tangki sehingga dapat mendinginkan transformator dengan lebih baik. Kekentalan relatif minyak transformator tidak boleh lebih dari  $4,2^0$  pada suhu  $20^0\text{C}$  dan  $1,8^0$ , hingga  $1,85^0$ . Maksimum  $2^0$  pada suhu  $50^0\text{C}$ . Bedanya dengan minyak pelincir, minyak transformator kekentalannya akan naik jika makin lama digunakan sedangkan minyak pelincir sebaliknya. Seperti terlihat pada Gb. 3.7 pada Viskosimeter terdapat 2 bejana yaitu bejana 1 dan bejana 2.



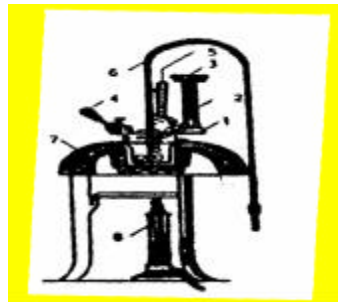
Gambar 3.7 Viskosimeter

Minyak yang akan diuji dituangkan ke dalam bejana 2 sehingga permukaannya mencapai garis atau tanda ketiga di bagian dalam bejana. Pada dasar bejana tersebut terdapat lubang yang besarnya dapat diatur dengan menggunakan jarum penyumbat 3. Bejana luar 1 diisi dengan air yang dipanasi dengan pemanas yang berbentuk cincin dan diaduk dengan pengaduk 5 sehingga panasnya merata. Suhu minyak tidak boleh berubah secara mendadak selama pengujian, karena air mempunyai kapasitas panas tinggi. Sebelum pengukuran, viskosimeter harus dicuci dengan bensin dan kemudian dikeringkan. Jarum 3 dipasangkan pada posisi ujungnya menutup tepat lubang di dasar bejana 2. Tepat di bawah lubang dipasangkan tabung pengukuran 6 (dengan tanda 200 ml pada lehernya). Kemudian bejana 2 diisi minyak, air pada bejana 1 dipanasi dengan pemanas 7. Pada saat termometer 4 terbaca suhu yang dikehendaki, minyak dialirkan ke dalam tabung 6 hingga mencapai 200 ml. Waktu yang diperlukan untuk mengisi tabung 6 hingga 200 ml kemudian dibagi dengan



konstanta viskosimeter disebut viskositas relatif dengan satuan derajat. Konstanta viskosimeter adalah sama dengan waktu yang diperlukan oleh air destilasi volume 200 ml keluar dari viskosimeter pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$ . Pada prakteknya, besarnya waktu tersebut berkisar antara 50 hingga 52 detik. Pengaturan suhu air jika tidak ada gas yang mempengaruhi dapat dilakukan dengan menambahkan air panas atau dingin ke dalam bejana 1. Minyak transformator sebagai pendingin perlu diperhatikan kekentalannya tidak terlalu tinggi dan titik nyala cukup tinggi. Titik nyala untuk minyak transformator tidak boleh lebih rendah dari  $135^{\circ}\text{C}$  untuk minyak yang masih baru dan  $130^{\circ}\text{C}$  untuk minyak yang sedang digunakan. Titik nyala dapat diukur dengan alat seperti ditunjukkan pada Gb.3.7 Cara pengujian titik nyala adalah sebagai berikut : Minyak yang akan diuji dituangkan ke dalam cangkir hingga permukaannya setinggi tanda tertentu yang ada di dalam cangkir, kemudian penutup 1 dipasang dan pemanasan dimulai. Minyak kemudian diaduk secara terus menerus dengan pengaduk 6. Suhu dibuat naik 2 derajat setiap menit. Mulai suhu  $100^{\circ}\text{C}$  pengujian titik nyala dilakukan setiap kenaikan 1 derajat dengan cara menghentikan pencampuran yaitu memutar kepala sekrup 3 sehingga menggerakkan tutup 1. Nyala dari pembakar 4 didekatkan ke permukaan minyak sehingga suhu pada permukaan minyak naik dan uapnya terbakar oleh nyala api tersebut. Tekanan yang terbaca pada barometer hubungannya dengan kenaikan suhu adalah :

$$T = 0,0345 (760 - p); \quad p \text{ adalah tekanan barometris dalam mmHg.}$$



Gambar 3.8 Alat pengujian minyak

Keterangan :

(1)penutup (2)pipa ulir (3)sekrup (4)pembakar (5)termometer (6)pengaduk (7)kolom (8)udara (9)pembakar. Sebelum digunakan peralatan harus benar-benar bersih dan kering. Sebab jika ada alat tersebut terdapat sisa bensin pembersih, akan menyebabkan titik nyala minyak menurun. Seperti halnya pada bahan isolasi padat, pada minyak transformator juga terjadi sudut kerugian dielektrik  $\tan \delta$ . Harga  $\tan \delta$  akan mempengaruhi besarnya rugi daya. Pengetesan  $\tan \delta$  minyak transformator dapat dilakukan dengan alat seperti ditunjukkan pada Gb. 3.8 Peralatan pengetesan  $\tan \delta$  pada Gb. 3-4 mendapatkan rekomendasi dari CIGRE (Comference Internationale des Grandes Reaux Electrique). Untuk pengetesan  $\tan \delta$  digunakan arus bolak balik dengan frekuensi 40 hingga 60 Hz. Tegangan yang harus digunakan harus sinusoida. Pengukuran digunakan pada tegangan tembus 0,5 hingga 1 kV/ mm pada suhu  $90^{\circ} \text{C}$  dan dimulai pada saat elektroda suhunya  $+0,5^{\circ} \text{C}$  dari suhu pengukuran yang dikehendaki.

Untuk pengukuran resistansi dengan alat yang sama, digunakan arus searah (umumnya 500 V). Arus yang mengalir dicatat setelah arus searah diberikan selama 1 menit, setelah itu dicatat lagi setelah polaritasnya dibalik selama 1 menit. Tetapi sebelum pengukuran dengan polaritas yang dibalik tersebut, elektrode dihubung singkatkan selama kurang lebih 5 menit. Resistivitas dari minyak adalah hasil rata-rata dari kedua macam pengukuran.

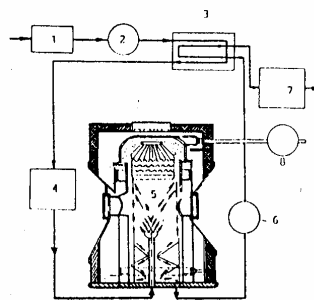
## **2. Proses Pemurnian Minyak Transformator**

Minyak transformator dapat dikotori oleh uap air, fiber (misalnya : kertas, kayu, tekstil), damar dan sebagainya, Hal ini dapat mempengaruhi kemurnian minyak transformator. Bentuk dari pengotoran dapat bermacam-macam yaitu : meleleh dan mencairnya bahan-bahan yang digunakan di dalam transformator, partikel-partikel yang mengapung pada minyak, partikel-partikel yang mengendap di dasar tangki, pada belitan atau pada intinya. Dengan adanya pengotoran maka tegangan tembus minyak akan menurun dan ini berarti mengurangi atau menurunkannya umur pemakaian minyak. Akhir-akhir ini usaha memperlambat

terjadinya penurunan tegangan tembus minyak transformator untuk pemakaian pada transformator yang bertegangan kerja tinggi dan dayanya besar, ruangan yang terdapat di atas permukaan minyak diisi dengan gas murni (biasanya Nitrogen). Cara lain untuk memperpanjang umur minyak transformator adalah dengan mencampurkan senyawa tertentu antara lain : paraoki dipenilamin akan berwarna kemerah-merahan.

a. Pemanasan.

Pada cara ini minyak transformator dipanasi hingga titik didih air pada perangkat khusus yang disebut Penggodok minyak (Oil Boiler). Air yang terkandung di dalam minyak akan menguap. Cara ini dianggap sebagai cara yang paling sederhana dalam hal pemurnian minyak transformator. Dengan cara ini bahan-bahan pencemar padat, misalnya fiber, jelaga, akan tetap tinggal di dalam minyak. Apabila pemanasan tersebut mendekati titik penguapan minyak, akan menyebabkan umur minyak berkurang. Namun hal dapat diatasi dengan cara memanaskan minyak di tempat yang pakem, sehingga air akan menguap pada suhu yang relatif lebih rendah. Namun demikian pencemar selain air akan tetap tinggal di dalam minyak. Sebagai pengembangannya pemurnian minyak dengan udara pakem seperti terlihat pada Gb. 3.10.



Gambar 3.10 Proses pemurnian minyak

Keterangan :

- (1) penyaring awal (2) pompa (3) pemindah panas (4) pemanas listrik (5) tabung pakem (6) pompa (7) penyaring tekan (8) pompa pakem (9)

b. Penyaringan.

Pada metode ini digunakan kertas khusus untuk menyaring minyak yang tercemar. Untuk mempercepat waktu penyaringan, digunakan tekanan. Air yang terkandung di dalam minyak transformator diserap dengan kertas higroskopis. Dengan cara ini baik air maupun partikel-partikel pencemar lainnya akan tersaring sekaligus. Untuk menambah output mesin penyaring, minyak dipanasi  $40^{\circ}$  hingga  $45^{\circ}$  C sehingga viskositas minyak menurun dan dengan demikian makin memudahkan penyaringan. Normalnya, minyak yang akan disaring dimasukkan ke filter atau penyaring dengan tekanan 3 hingga 5 atmosfer. Biasanya penyaring diganti setelah digunakan selama 4 jam, tetapi bila minyaknya sangat kotor, pengantiannya dilakukan setiap 0,5 hingga 1 jam.

## **E. BAHAN ISOLASI PADAT**

Kaca dan porselin adalah tergolong bahan mineral, tetapi penggunaannya tidak pada bentuk atau keadaan alaminya melainkan harus diproses terlebih dahulu dengan pemanasan (pembakaran), pengerasan dan pelumeran. Itulah sebabnya maka pembahasannya dipisahkan dengan pembahasan bahan mineral pada bab sebelumnya.

### **1. 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  $8,1 \text{ g/cm}^2$ , kekuatan tekannya 6000 hingga  $21000 \text{ kg/cm}^2$ , kekuatan tariknya 100 hingga  $300 \text{ kg/cm}^2$ . 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  $1700^{\circ}$  C. Makin sedikit kandungan  $\text{SiO}_2$  nya makin rendah titik pelembekan suatu kaca. Demikian pula halnya dengan muai panjang ( $\alpha$ ) nya, makin banyak kadar  $\text{SiO}_2$  yang dikandungnya akan makin kecil  $\alpha$  nya. Muai panjang untuk kaca berkisar antara  $5,5 \cdot 10^{-7}$  hingga  $150 \cdot 10^{-7}$  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 devitrikikasi. 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 ( $\text{Na B}_4\text{O}_2$ ), 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 : meniupan (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 lelehnya menjadi lebih rendah. Kaca silika di dalam keteknikan diklasifikasikan menjadi 3 kelompok yaitu :

**a. Kaca alkali tanpa oksida berat.**

Kaca ini mempunyai titik leleh 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 PbO atau kaca Crown ditambah dengan 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 pelunakan yang sangat tinggi.

Pemakaian kaca pada keteknikan antara lain :

- Pembuatan bola lampu, tabung elektronik, penyangga filamen. Titik pelunakan 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 MHz, suhu  $20^\circ\text{C}$ ,  $\tan \delta = 0,0009$  pada frekuensi 1 MHz, suhu  $200^\circ\text{C}$ ,  $\tan \delta = 0,0012$ . Kaca minos mempunyai  $\alpha = 82 \cdot 10^{-7}$  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 penggunaan ini, selain sifat kelistrikan yang baik juga dituntut mempunyai kekuatan mekanis.

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  $\approx 600^\circ\text{C}$ . 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 kuasa.



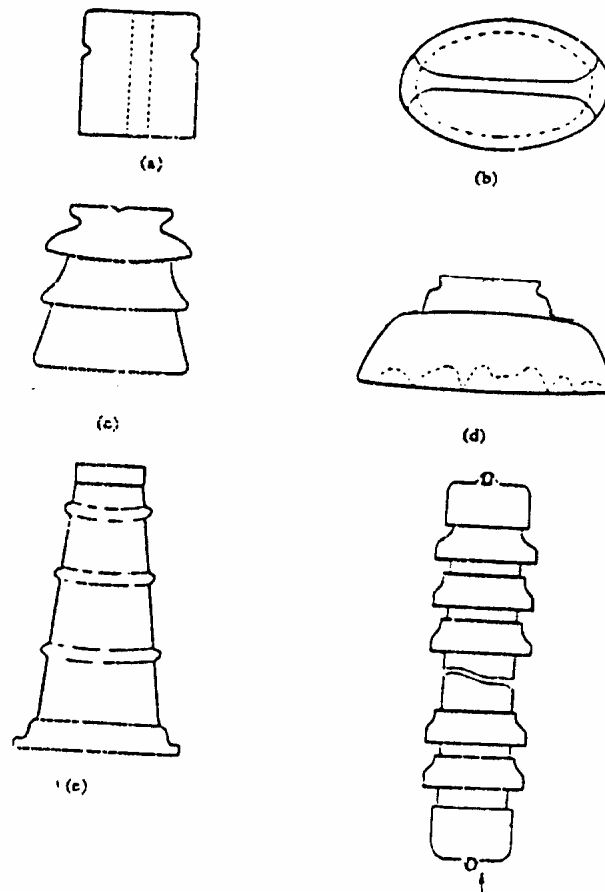
Sedangkan untuk menambahkan kemampuan lekatnya enamel yang digunakan melapis baja atau besi tuang, ditambah Ni dan Co.

## **2. *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 : Fe S, Ti O<sub>2</sub>, alkali fluorida, alkali fospat dan logam-logam alkali tanah. Sitol mempunyai sifat mekanis yang tinggi, ? yang rendah sehingga tahan terhadap perubahan suhu yang mendadak. Permittivitas relatif ( $\epsilon_r$ ) berkisar antara 5 sampai 6, tan  $\delta$  pada frekuensi 1 MHz sekitar 0,01 dan pada 10.000 MHz sekitar 0,001.

## **3. *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.3.11



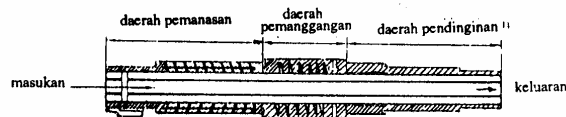
Gambar 3.11 Beberapa isolator porselin

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

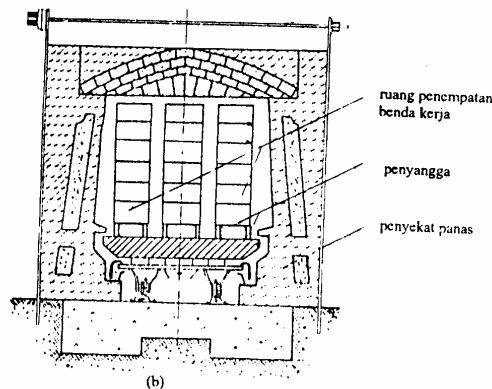
produk. Pada prose pelapisan dengan gelas, kaca halus atau bahan dasar kaca atau campuran keduanya dipanaskan hingga meleleh, kemudian digunakan melapisi perangkat yang dikehendaki dengan cara mencelupkan benda atau permukaan yang diinginkan untuk dilapisi. Pelapisan dengan gelas semacam ini digunakan 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 lilitan elemen pemanas jika yang digunakan pemanas listrik. Hal ini untuk menghindari pemanasan yang tidak merata dan pembentukan jelaga. Bagian dasar dari benda tidak perlu dilapis dengan gelas agar tidak melekat dengan dasar ruang pembakaran jika sudah dingin.

Terdapat 2 macam oven untuk pembakaran porselin yaitu jenis Pemanggang (Kiln)



Gambar 3.12 Pembakaran porselin membujur



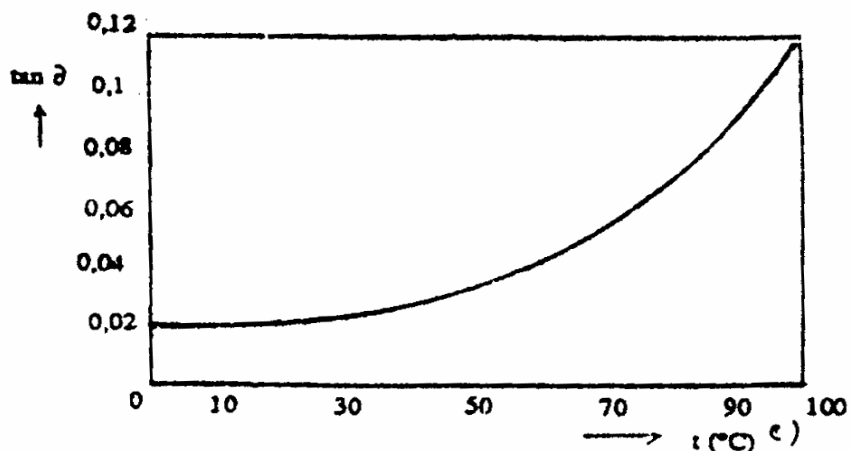
Gambar 3.14 Pembakaran porselin melintang

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. 3.14. 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.

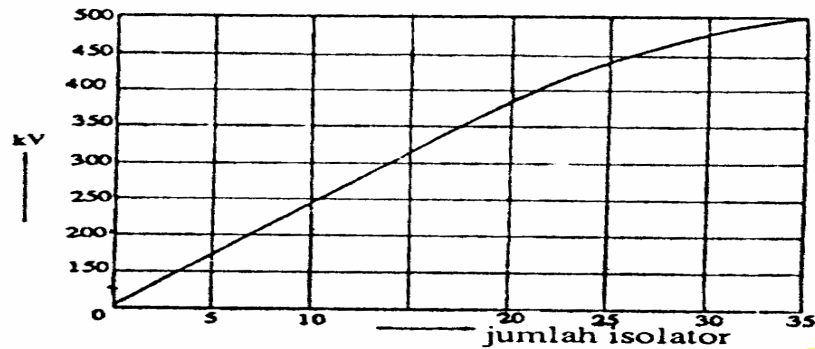
Suhu tertinggi adalah didaerah tengah yaitu daerah pemanggang dan bagian pinggir lebih dingin. Dengan demikian selama perjalanan benda-benda kerja

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 menyambungnya 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 (?)  $3 \cdot 10^{-6}$  hingga  $4,5 \cdot 10^{-6}$  per<sup>0</sup> C. Hal ini perlu mendapatkan perhatian jika dilem dengan semen atau diikat dengan logam, karena ? semen =  $11 \cdot 10^{-6}$  per<sup>0</sup> C, ? baja =  $14 \cdot 10^{-6}$  per<sup>0</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 3.15 Kurva  $\alpha = f(t)$  pada porselen



Gambar 3.16 Tegangan kerja = f (jumlah isolator)

Sifat kelistrikan porselin antara lain : tegangan tembus berkisar antara 10 hingga 30 kV/ mm, resistivitas  $10^{11}$  hingga  $10^{14}$   $\Omega \cdot \text{cm}$ , permitivitas (?) berkisar antara 6 hingga 7,  $\tan \delta$  0,015 hingga 0,02. Sudut kerugian dielektrik akan naik jika suhu dinaikkan seperti ditunjukkan pada Gb. 3.16. 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).

### **F. RANGKUMAN 3**

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. Ruang lingkup analisis bahan isolasi ini meliputi :

- (1) Sifat Kelistrikan
- (2) Sifat mekanik
- (3) Jenis bahan isolasi
- (4) Bahan isolasi cair
- (5) Bahan isolasi padat

### **G. TUGAS KEGIATAN BELAJAR 3**

- a. Jelaskan secara singkat apa yang dimaksud dengan resistivitas dan permitivitas bahan isolasi !
- b. Carilah bahan - bahan isolasi lain yang berkaitan dengan ilmu bahan dari berbagai sumber (internet) !
- c. Lakukan pengamatan isolasi yang terbuat dari kaca, mika atau porselin !  
Kemudian beri komentar kelebihan dan kekurangannya !

### **H. TES FORMATIF 3**

1. Jelaskan fungsi bahan isolasi pada sistem tenaga listrik !
2. Sebutkan tiga hal pokok sifat kelistrikan bahan isolasi !
3. Jelaskan pengaruh panas/termal pada isolasi !
4. Jelaskan pengertian bahan isolasi gas dan isolasi cair !

### **I. KUNCI JAWABAN FORMATIF 3**

1. Bahan isolasi berfungsi sebagai pembatas bagian-bagian yang bertegangan dengan yang tidak !
2. Tiga sifat pokok : sifat kelistrikan, sifat mekanik dan sifat kerugian dielektrik !

3. Temperatur memberikan pengaruh terhadap sifat elektrik, kekuatan mekanik, kekerasan, viskositas, ketahanan terhadap pengaruh kimia. Dan dalam kurun waktu tertentu akan mengalami perubahan karakteristik tersebut.
4. Isolasi dalam system tenaga listrik multi bentuk dan multi fungsi. Untuk transformator , PMT memakai isolasi cair atau gas sedangkan untuk isolator gantung sipakai isolasi bahan padat seperti kaca dan porselin.

**J. LEMBAR KERJA 3**

Untuk melakukan pengayaan substansi materi yang telah disajikan, maka peserta diklat wajib melakukan tugas terstruktur yakni melakukan praktek di lab. dan survey lapangan terhadap industri terkait. Untuk itu peserta didik setelah tuntas dengan modul diharapkan langsung cek in industridan mengisi form berikut :

No	Uraian Kegiatan	Kompetensi/Subkompetensi yg akan dicapai	Tempat	Pembimbing Lapangan



## **KEGIATAN BELAJAR 4**

### **GEJALA MEDAN TINGGI BAHAN LISTRIK**

#### **A. PENDAHULUAN**

Bahan listrik untuk tegangan tinggi pada dasarnya tidak berbeda dengan yang dipakai pada tegangan rendah, hanya perbedaan yang mendasar terletak pada analisis sifat, perilaku dan prototype dasar yang jauh lebih kompleks yakni memasukan variable atau konstanta-konstanta baru seperti misalnya pada tegangan tinggi sifat kasitansi penghantar sangat menonjol. Salah satu bahan listrik yang sangat berbeda karakteristiknya adalah bahan isolasi yang fungsi dan penggunaanya sangat luas.

Udara dan gas termasuk bahan isolasi yang banyak digunakan untuk mengisolasi peralatan listrik tegangan tinggi. Isolasi berfungsi memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan, sehingga antar penghantar-penghantar tersebut tidak terjadi lompatan listrik (flashover) atau percikan (spark-over). Untuk tegangan yang semakin tinggi diperlukan bahan isolasi yang mempunyai kuat isolasi yang lebih tinggi. Apabila tegangan yang diterapkan mencapai tingkat ketinggian tertentu, maka bahan isolasi tersebut akan mengalami pelepasan muatan (lucutan, discharge), yang merupakan suatu bentuk kegagalan listrik. Kegagalan ini menyebabkan hilangnya tegangan dan mengalirnya arus dalam bahan isolasi. Dalam proses pelepasan listrik ada beberapa mekanisme pembangkitan atau kehilangan ion, baik dalam bentuk tunggal, maupun dalam kombinasi. Proses dasar pelepasan dalam gas meliputi antara lain :

- a. Pembangkitan ion dengan cara benturan (collision) Elektron, fotoionisasi, ionisasi oleh benturan ion-positif, ionisasi termal, pelepasan (detachment) electron, ionisasi kumulatif, dan efek ? sekunder.

- b. Kehilangan ion dengan cara penggabungan (attachment) elektron, rekombinasi dan difusi.

## B. PROSES DASAR IONISASI

Udara ideal adalah gas yang hanya terdiri dari molekul-molekul netral, sehingga tidak dapat mengalirkan arus listrik. Tetapi dalam kenyataannya, udara yang sesungguhnya tidak hanya terdiri dari molekul-molekul netral saja tetapi ada sebagian kecil dari padanya berupa ion-ion dan elektron-elektron bebas, yang akan mengakibatkan udara dan gas mengalirkan arus walaupun terbatas. Kegagalan listrik yang terjadi di udara atau gas pertama-tama tergantung dari jumlah elektron bebas yang ada di udara atau gas tersebut. Konsentrasi elektron bebas ini dalam keadaan normal sangat kecil dan ditentukan oleh pengaruh radioaktif dari luar. Pengaruh ini dapat berupa radiasi ultra violet dari sinar matahari, radiasi radioaktif dari bumi, radiasi sinar kosmis dari angkasa luar dan sebagainya, yang kesemuanya dapat menyebabkan udara terionisasi. Jika diantara elektroda diterapkan suatu tegangan  $V$ , maka akan timbul suatu medan listrik  $E$  yang mempunyai besar dan arah tertentu. Di dalam medan listrik, elektron-elektron bebas akan mendapat energi yang cukup kuat, sehingga dapat merangsang timbulnya proses ionisasi.

Besar energi tersebut adalah :

$$U = eV = \frac{1}{2} m_e v_e^2$$

dimana :  $e$  = muatan elektron

$V$  = beda potensial antara kedua elektroda

$M_e$  = massa elektron

$V_e$  = kecepatan elektron

## C. IONISASI KARENA BENTURAN ELEKTRON

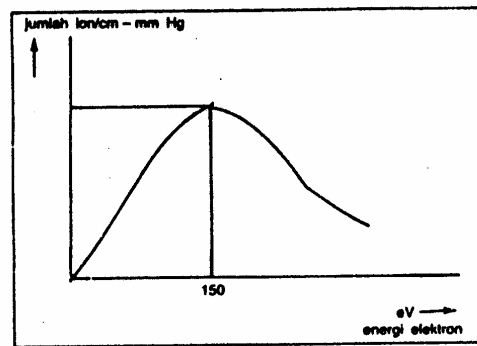
Jika gradien tegangan yang ada cukup tinggi maka jumlah elektron yang dionisasikan akan lebih banyak dibandingkan jumlah ion yang ditangkap menjadi molekul oksigen. Tiap-tiap elektron ini kemudian akan berjalan menuju anoda secara kontinu, sambil membuat benturan-benturan yang kemudian akan

membebaskan lebih banyak elektron. Ionisasi karena benturan ini mungkin merupakan proses yang paling penting dalam kegagalan udara atau gas.

Sebuah elektron tunggal yang dibebaskan oleh pengaruh luar akan menimbulkan banjir elektron (avalanche), yaitu kelompok elektron yang bertambah secara cepat dan bergerak maju meninggalkan ion positif pada lintasannya. Efektivitas ionisasi karena benturan (tumbukan) elektron ditentukan oleh energi (lihat persamaan 1-1) atau kecepatan elektron pembentur yaitu :

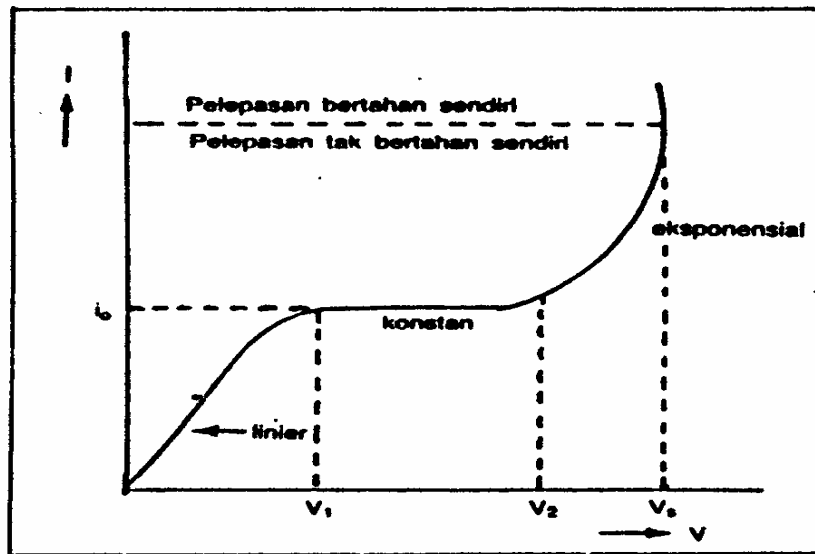
$$V_e = \sqrt{\frac{2 e \mathcal{V}}{m_e}}$$

Jika kecepatan elektron  $v_e$  sangat lambat, misalnya oleh sebab tegangan  $V$  yang diterapkan rendah, maka tidak akan terjadi proses ionisasi, karena energi yang dihasilkan tidak cukup kuat untuk membebaskan elektron berikutnya. Jika kecepatan elektron  $v_e$  terlalu tinggi, maka ionisasi juga sulit terjadi. Dalam kesempatan ini ada kemungkinan elektron bebas tersebut dalam penggerakannya akan mendekati suatu atom, tanpa mengeluarkan elektron dari padanya. Dari kedua hal tersebut dapat disimpulkan bahwa dalam proses ionisasi, ada sesuatu kecepatan elektron bebas yang optimum, dimana kebolehjadian (probability) adalah maksimum. Yang dimaksud dengan kecepatan elektron yang optimum adalah : suatu kecepatan yang tepat untuk dapat memecahkan atom menjadi elektron dan ion. Selain itu kecepatan yang optimum ini harus sering terjadi supaya bila gerakan yang pertama tidak dapat membentur atom dan membebaskan elektron dari padanya. Di dalam proses ionisasi dikenal satuan ionisasi, atau kebolehjadian ionisasi (probability of ionization) yang didefinisikan sebagai jumlah pasangan ion yang dapat dibebaskan oleh sebuah elektron yang bergerak sepanjang lintasan 1 cm dalam gas pada tekanan 1 mm Hg. Gambar 1.2, memperlihatkan grafik kebolehjadian ionisasi untuk udara. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa untuk energi sebesar 150 eV, akan dibebaskan 10 pasangan ion yang terjadi jika elektronnya bergerak sepanjang 1 cm pada tekanan 1 mm Hg.



Gambar 4.1 Grafik keboleh jadian ionisasi untuk udara

Proses pelepasan (discharge) pada udara dan gas dapat dibagi menjadi 2 bagian, yaitu pelepasan bertahan sendiri (self sustaining discharge) dan pelepasan tak bertahan (non self sustaining discharge). Dalam hal ini mekanisme kegagalan gas dan udara adalah suatu bentuk transisi dari keadaan pelepasan tak bertahan menuju pelepasan bertahan sendiri. Pelepasan dalam gas seperti diuraikan di muka terjadi karena ada elektron-elektron awal yang berasal dari radiasi kosmik dan radioaktivitas. Karena gerakan elektron adalah fungsi dari tegangan dan arahnya berlawanan dengan gerakan arus listrik, maka jika suatu tegangan diterapkan antara dua elektroda (katoda dan anoda), arus yang bergerak menuju katoda akan bertambah perlahan-lahan sesuai dengan Bergeraknya elektron. Gerakan ini sesuai dengan arah kuat medan yang ada. Perubahan arus antara dua elektroda pelat yang sejajar sebagai fungsi dari kuat medan yang diterapkan untuk pertama kali diselidiki oleh **Townsend**. Proses yang terjadi dapat digambarkan seperti pada gambar 4.2. Menurut **Townsend** arusnya mula-mula naik sebanding dengan tegangan yang diterapkan. Bagian awal grafik ini linier sebab penambahan elektron yang dibebaskan sebanding dengan naiknya tegangan yang diterapkan.



Gambar 4.2 Grafik kebolehjadian ion

Selanjutnya, pertambahan tegangan dari  $V_1$  ke  $V_2$  tidak akan menyebabkan pertambahan arus. Arusnya konstan pada harga  $i_0$ , yaitu arus foto listrik yang dihasilkan di katoda oleh penyinaran lembayung ultra (ultra violet). Arusnya konstan, karena semua elektron yang dibebaskan karena penyinaran tersebut sudah habis. Keadaan ini disebut kejenuhan.

Jika tegangan dinaikkan terus sehingga melebihi  $V_2$ , maka arusnya akan naik secara eksponensial. Kenaikan arus sesudah tegangan melebihi  $V_2$  menurut **Townsend** disebabkan oleh ionisasi gas karena benturan elektron. Pada waktu kuat medan naik, maka elektron-elektron yang meninggalkan katoda makin lama makin dipercepat, sehingga elektron-elektron ini memiliki cukup energi untuk memungkinkan terjadinya ionisasi akibat benturan dengan atom atau molekul gas. Tumbukan-tumbukan ini akan menimbulkan elektron-elektron baru, yang kemudian juga memperoleh tambahan energi dari medan sehingga mampu pula melakukan ionisasi. Dengan demikian, jumlah elektron yang dibebaskan makin lama makin banyak dan arusnya pun makin besar. Jika tegangannya telah mencapai suatu harga kritis  $V_s$ , maka arus bertambah sangat cepat dan akhirnya akan terjadi pelepasan bertahan sendiri.

Guna dapat menjelaskan kenaikan arus ini Townsend memperkenalkan suatu faktor  $\alpha$ , sekarang dikenal sebagai koefisien kesatu ionisasi Townsend, yang didefinisikan sebagai jumlah elektron yang dihasilkan di dalam jalur sebuah elektron yang bergerak sepanjang 1 cm searah dengan medan. Dengan demikian, kenaikan  $dn$  terhadap jumlah elektron  $n$  sepanjang jarak  $dx$  dapat ditulis sebagai :

$$Dn = \alpha n dx$$

$$n = I_0 e^{\alpha x}$$

Karena itu, maka arus sepanjang celah (gap) antara katoda dan anoda akan naik secara eksponensial pula, atau

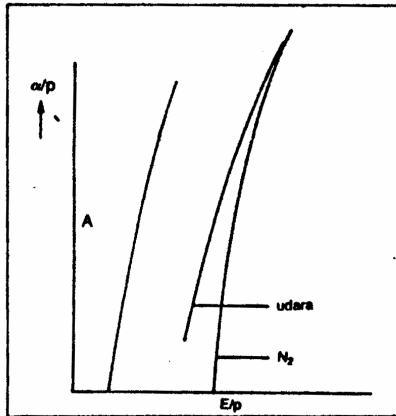
$$I = I_0 e^{\alpha x}$$

di mana :

$I_0$  = arus yang meninggalkan katoda

$d$  = jarak celah

Hubungan antara koefisien pertama di atas dengan gradien medan dapat dijabarkan secara teoritis dan dibuktikan dengan percobaan. Pengukuran  $\alpha$  untuk gradien medan  $E$  dan tekanan gas  $p$  tertentu dapat dilakukan dengan menerapkan persamaan di atas pada sebuah percobaan dimana  $d$  diubah dan  $I$  diukur, sedangkan  $I_0$ ,  $E$  dan  $p$  dibuat konstan. Contoh lengkung  $\alpha/p$  untuk beberapa jenis gas terlihat pada gambar 4.3 Dalam penentuan harga  $\alpha$  perlu diperhatikan, bahwa hanya kepadatan arus yang rendah saja yang digunakan, agar tidak terjadi distorsi medan akibat muatan ruang yang mungkin memberikan hasil yang tidak dapat diandalkan.



Gambar 4.3 Gradien medan

#### D. IONISASI KARENA CAHAYA (FOTOIONISASI)

Seperti dapat dilihat di atas, untuk memungkinkan terjadinya proses ionisasi, diperlukan energi. Suatu sinar (cahaya) dengan frekuensi  $\nu$  akan mempunyai energi sebesar :

$$U = h\nu$$

dimana :

$h$  = konstantan Planck

Kekuatan energi atau foton ini dapat mengionisasikan molekul yang netral dalam gas jika :

$$U = h\nu \geq eV_i$$

dimana :

$V_i$  = potensial ionisasi

Dari persamaan (1-5) dapat dilihat bahwa energi yang datang harus lebih besar dari atau sama dengan energi yang diperlukan untuk membebaskan elektron dari molekul gas.

Bila  $h\nu < eV_i$

maka energi yang datang tidak akan menyebabkan terjadi ionisasi. Tetapi energi ini akan diserap oleh molekul atau atom gas, sehingga energi molekul atau atom akan naik ke tingkat yang lebih tinggi dari energi semula. Hal ini dapat dinyatakan sebagai :

$$A + h\nu \rightarrow A_1$$

dimana :

$A_1$  = molekul atau sama dengan energi yang lebih tinggi.

Proses ini disebut fotoeksitasi (photoexcitation)

Bila

$$h\nu > eV_1$$

maka kelebihan energi ini dialihkan kepada elektron yang dibebaskan dalam bentuk energi kinetik.

$$h\nu - eV_1 = \frac{1}{2} m_e V^2$$

Secara umum proses fotoionisasi dapat dinyatakan dengan persamaan :



dimana :

$A$  = molekul mula-mula

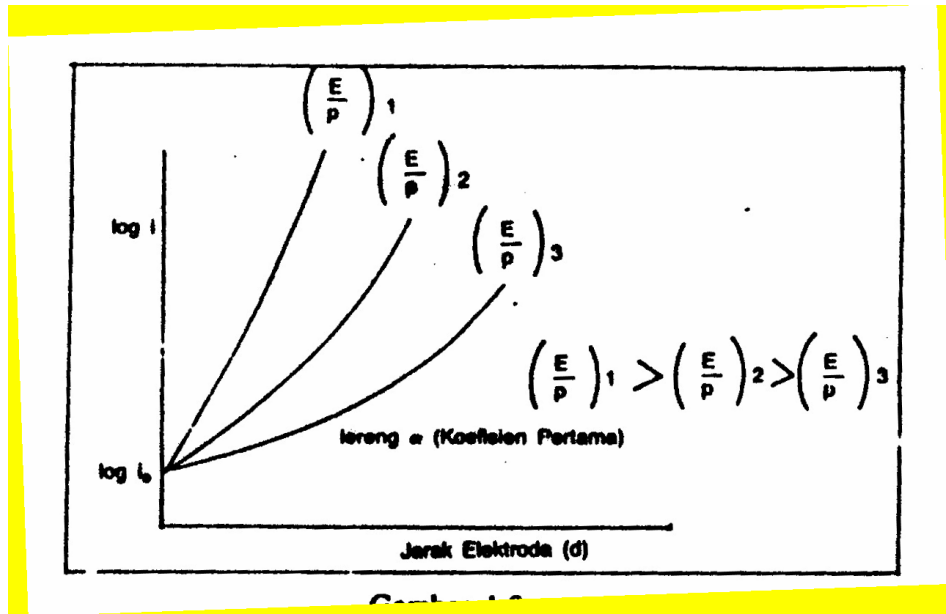
$A^+$  = molekul yang bebas 1 elektronnya

$e^-$  = elektron yang dibebaskan oleh proses ionisasi

## E. KOEFISIEN KEDUA IONISASI TOWNSEND

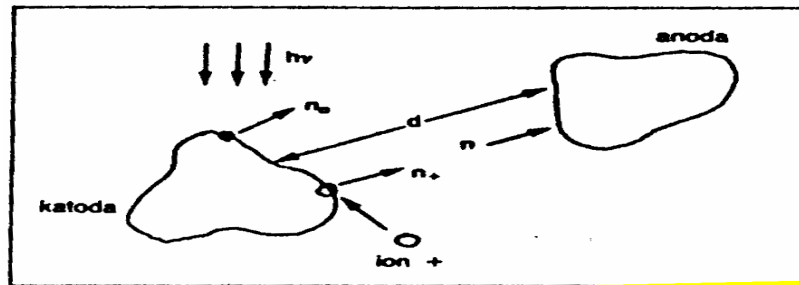
Dari persamaan di atas) diperoleh hubungan yang linier antara  $\log i$  dan jarak celah  $d$ , dengan lereng (slope)  $\alpha$ , yang dikenal sebagai koefisien pertama ionisasi **Townsend**. Hubungan linier ini tidak berlaku lagi pada tegangan yang lebih tinggi. Dari percobaan-percobaan yang dilakukan oleh **Townsend** ternyata bahwa pada tegangan yang lebih tinggi arusnya naik lebih cepat daripada apa yang tertulis pada persamaan di atas. Hal ini terlihat pada gambar 4.4, yang menunjukkan hubungan antara  $\log i$  sebagai fungsi dari jarak antara elektroda pada tekanan yang tetap. Untuk menjelaskan penyimpangan dari kelinieran pada tegangan yang lebih tinggi **Townsend** mengemukakan pendapat bahwa pasti ada mekanisme kedua yang mempengaruhi arus. Ia mengemukakan adanya pembebasan elektron (a) dalam gas, karena benturan dengan ion-ion positif, dan kemudian (b) dari katoda karena pemboman ion positif seperti diterapkan dalam





Gambar 4.4 Sifat elektroda pada tekanan tetap

bagian di atas. Proses lain yang menyebabkan lengkung log i berbentuk ke atas (lihat Gambar 4.4) adalah emisi elektron sekunder dari katoda karena dampak foton.



Gambar 4.5 Karakteristik katoda

Uraian di atas dapat dijelaskan dengan memisalkan bahwa (lihat gambar 4.5) :

$n$  = jumlah elektron yang mencapai anoda perdetik;

$n_0$  = jumlah elektron yang keluar dari katoda perdetik karena (misalnya) penyinaran ultra violet

$n_+$  = jumlah elektron yang keluar dari katoda perdetik karena benturan ion positif

$\alpha$  = jumlah elektron yang dibebaskan dari katoda per ion positif yang membentur.

Maka, sesuai dengan persamaan berikut :

$$n = n_0 e^{\alpha d}$$

dimana :

$\alpha$  = koefisien pertama ionisasi **Townsend**

$d$  = jarak antara katoda dan anoda

dan, sesuai dengan permissalan di atas

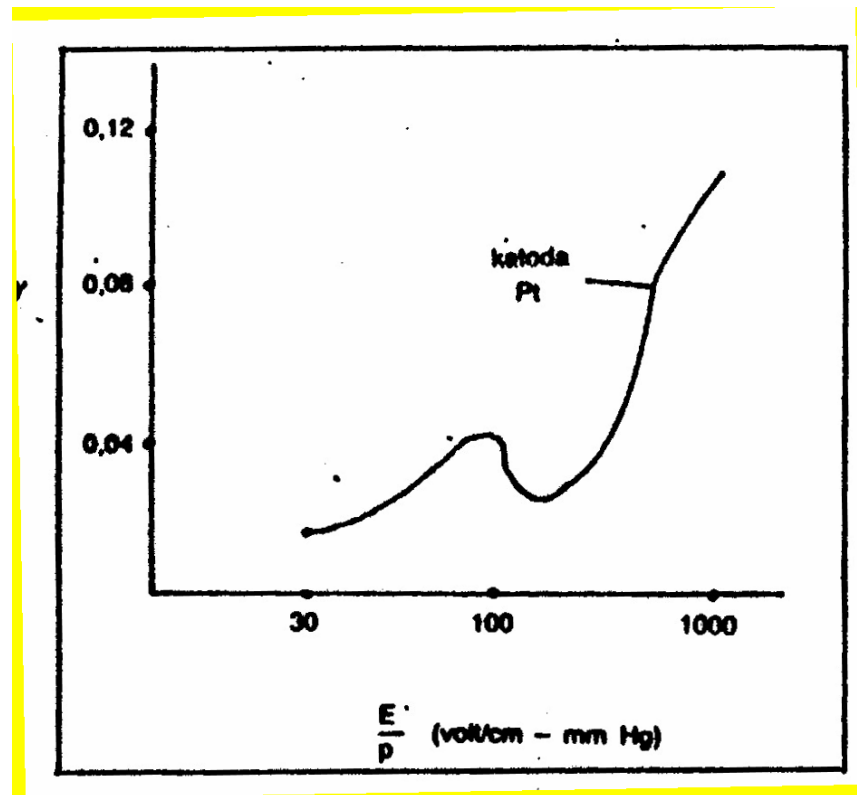
$$n_+ = n_0 e^{\alpha d}$$

Dengan memasukkan persamaan diatas dalam persamaan berikut diperoleh

$$n = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - e^{-\alpha d}}$$

$$i = \frac{i_0 e^{\alpha d}}{1 - e^{-\alpha d}}$$

Nilai  $\alpha$  dari percobaan dapat ditentukan dari persamaan terakhir dengan mengukur besarnya arus dalam celah untuk berbagai tekanan gas, kuat medan dan panjang celah dan dengan menggunakan nilai  $\alpha$  yang bersangkutan. Gambar 4.6 menunjukkan koefisien  $\alpha$  dalam gas hidrogen sebagai fungsi dari E/p untuk katoda platinumium (Pt). Nilai  $\alpha$  sangat dipengaruhi oleh sifat permukaan katoda. Permukaan bahan dengan fungsi kerja rendah menghasilkan emisi yang lebih tinggi daripada bahan yang fungsi kerjanya lebih besar. Nilai  $\alpha$  pada E/p kecil lebih rendah daripada untuk E/p yang tinggi.



Gambar 4.6 Sifat gas hydrogen

Hal ini disebabkan karena pada  $E/p$  besar terdapat lebih banyak ion positif dan foton yang memiliki energi cukup tinggi untuk mengeluarkan elektron dari permukaan katoda. Adanya puncak pada lengkung mungkin disebabkan oleh pengaruh panjang gelombang emisi fotoelektrik. Contoh nilai ? untuk berbagai tegangan gagal minimum  $V_m$  bagai udara dan hidrogen tertera pada bagian lain dari modul ini

#### **F. RANGKUMAN 4**

Bahan listrik untuk tegangan tinggi pada dasarnya tidak berbeda dengan yang dipakai pada tegangan rendah, hanya perbedaan yang mendasar terletak pada analisis sifat, perilaku dan prototype dasar yang jauh lebih kompleks yakni memasukan variable atau konstanta-konstanta baru seperti misalnya pada tegangan tinggi sifat kapasitansi penghantar sangat menonjol. Salah satu bahan listrik yang sangat berbeda karakteristiknya adalah bahan isolasi yang fungsi dan penggunaannya sangat luas.

Udara dan gas termasuk bahan isolasi yang banyak digunakan untuk mengisolasi peralatan listrik tegangan tinggi. Isolasi berfungsi memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan, sehingga antar penghantar-penghantar tersebut tidak terjadi lompatan listrik (flashover) atau percikan (spark-over). Untuk tegangan yang semakin tinggi diperlukan bahan isolasi yang mempunyai kuat isolasi yang lebih tinggi. Apabila tegangan yang diterapkan mencapai tingkat ketinggian tertentu, maka bahan isolasi tersebut akan mengalami pelepasan muatan (lucutan, discharge), yang merupakan suatu bentuk kegagalan listrik. Kegagalan ini menyebabkan hilangnya tegangan dan mengalirnya arus dalam bahan isolasi.

#### **G. TUGAS KEGIATAN BELAJAR 4**

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan tegangan tinggi!
2. Lakukan analisis pengaruh tegangan tinggi terhadap bahan listrik!
3. Carilah literature penunjang untuk gejala medan tinggi

#### **H. TES FORMATIF 3**

1. Apa yang dimaksud dengan kegagalan isolasi di udara !
2. Jelaskan proses dasar ionisasi yang berkaitan dengan bahan listrik !
3. Terangkan kapasitas elektron di udara !

#### **I. KUNCI JAWABAN FORMATIF 4**

1. Kegagalan isolasi terjadi apabila tegangan mencapai tingkat ambang batas, maka bahan isolasi akan mengalami pelepasan muatan (discharge).

2. Proses ionisasi timbul karena adanya elektro-elektron bebas berada pada medan listrik E yang akibatnya diperoleh energi cukup kuat, sehingga dapat merangsang timbulnya ionisasi
3. Kapasitas elektron berkaitan dengan kecepatan elektron bebas maksimum untuk memecahkan atom menjadi elektron dan ion

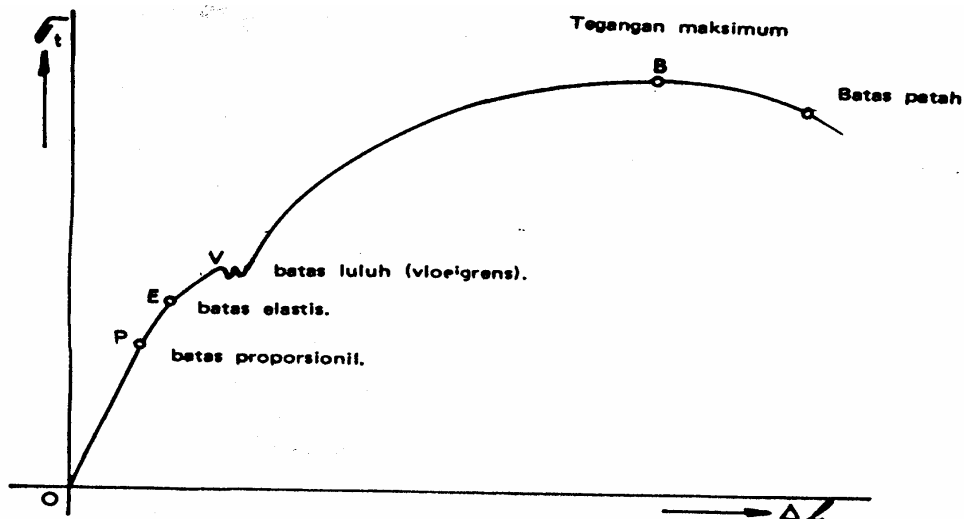
**J. LEMBAR KERJA 4**

Untuk melakukan pengayaan substansi materi yang telah disajikan, maka peserta diklat wajib melakukan tugas terstruktur yakni melakukan praktek di lab. dan survey lapangan terhadap industri terkait. Untuk itu peserta didik setelah tuntas dengan modul diharapkan langsung cek in industridan mengisi form berikut :

No	Uraian Kegiatan	Kompetensi/Subkompetensi yg akan dicapai	Tempat	Pembimbing Lapangan

### III. EVALUASI

1. Jelaskan grafik di bawah ini berkaitan dengan sifat bahan padat :



2. Tegangan geser yang diperkenankan pada sebuah benda sebesar  $1000 \text{ kg/cm}^2$ . Apabila luas potongan normal yang terjadi sebesar  $1000 \text{ mm}^2$ . Hitunglah besarnya beban yang dipikul benda tersebut ?
3. Jelaskan fungsi baja pada penghantar jenis ACSR ?
4. Sebutkan factor-faktor yang harus dipertimbangkan penentuan bahan menjadi isolator ?

## **KUNCI JAWABAN**

1. Grafik memperlihatkan perilaku bahan pada saat dipengaruhi oleh gaya luar. O – P adalah garis yang hampir linear menunjukkan daerah aman benda untuk kembali pada bentuk semula dengan toleransi sampai E. Sementara garis lengkung di atas diatas dari B-batas patah memperlihatkan daerah dimana bahan sudah mencapai titik optimum untuk berubah bentuk.
2. Diketahui :  $q = 1000 \text{ kg/cm}^2$  ;  $q = 1000 \text{ mm}^2$  ditanya : P ?

$$P = (1000) (10) = 10000 \text{ kg}$$

3. Baja untuk memberikan tambahan kekuatan mekanik pada alumunium. Sehingga secara keseluruhan ACSR mempunyai dua keunggulan. Daya hantar tinggi karena arus akan mengalir pada bidang permukaan yakni Al yang daya hantarnya tinggi sedangkan baja kekuatan mekaniknya jauh lebih besar.
4. Yang perlu diperhatikan untuk bahan isolasi adalah tegangan tembus, resistivitas , permitivitas serta kemampuan menahan tegangan pelepasan

## **IV. PENUTUP**

Modul Ilmu Bahan Listrik ini diharapkan dapat memberikan ruang terbuka untuk mencapai serangkaian kompetensi yang disyaratkan industri. Disamping tentunya kompetensi ini juga memberikan dukungan kuat untuk mencapai kompetensi-kompetensi lainnya. Guna lebih meningkatkan kapasitas, kapabilitas serta akuntabilitas akademik yang lebih luas diharapkan peserta diklat setelah membaca modul ini dilanjutkan dengan uji kompetensi yang dilakukan oleh asosiasi terkait dalam bidang ketenagalistrikan.



## DAFTAR PUSTAKA

John Vernon, 1979, *Introduction to Engineering Material*, English Language Book, Society & Mac Millan, London

Herman Polack, 1981, *Material Science and Metalurgy*, 3<sup>rd</sup> Edition, Reston Publishing Company, Virginia.

Raghavan, 1985, *Material Science and Engineering, a first course*, 2nd Edition, Private Limited, London

Seth, Swinder Parkash, 1981, *A Course in Electrical Engineering Material*, Dhanpat Rai & Sons, New Delhi



4	Peristilahan	<p>SMK kurikulum baru edisi 2004 secara keseluruhan.</p> <p>Daftar peristilahan yang dimunculkan diutamakan pada istilah-istilah dan mempunyai makna sangat penting dalam substansi materi yang sedang dibahas.</p>											
5	Petunjuk Penggunaan Modul	<p>Pedoman pemakaian modul diarahkan pada subyek pengajaran yaitu siswa dan guru. Siswa diharapkan dapat mempelajari modul dengan atau tanpa instruktur. Sedangkan guru diharapkan dapat menggunakan modul secara sistematis, terencana dan terprogram.</p>											
6	Pembelajaran 6.1 Penjelasan Umum	<p>Rencana pembelajaran dilakukan dalam dua bentuk pertama dalam bentuk tatap muka di kelas yang diarahkan pada pencapaian kompetensi pemahaman selama 4 jam per minggu. Jenis pembelajaran ini menghabiskan 40 % dari seluruh kompetensi yang akan di capai. Sedangkan model pendekatan kedua adalah melakukan kegiatan lapangan baik dalam bentuk simulasi komputer maupun langsung ke lokasi/industri terkait seperti praktek kerja lapangan dan sebagainya.</p> <p>Materi ilmu bahan listrik dibagi menjadi 5 bagian dalam bentuk Unit</p>	?				?	?	?				

		Kegiatan Belajar 1-5 yang meliputi : pengantar bahan listrik, karakteristik bahan isolasi, bahan penghantar listrik, bahan isolator dan gejala medan tinggi									
6.2 Unit Kegiatan Belajar 1		Unit kegiatan belajar ini dikembangkan untuk memberikan penjelasan dan pemahaman terhadap materi ilmu bahan listrik.									
a. Uraian sub materi		Mencakup pengertian dasar bahan listrik serta ruang lingkup dan jenis-jenis bahan listrik.									
b. Evaluasi		Sistem evaluasi meliputi dua bagian pertama evaluasi di bagian akhir UKB dan evaluasi akhir keseluruhan modul.									
6.3 Penjelasan Materi											
a. Materi 1		Pada UKB 1 diuraikan secara jelas konsep pengantar bahan listrik yang meliputi benda padat dengan karakteristik elektrik dan mekanik (Tegangan geser dan perubahan bentuk)	?				?	?	?		
Evaluasi		Evaluasi materi pertama dirancang agar siswa memiliki kompetensi dasar pemahaman benda padat dengan segala karakteristiknya baik elektrik maupun mekanik.									
b. Materi 2		Pada bagian kedua diuraikan sifat isolasi bahan listrik sebagai salah satu sifat yang pemanfaatannya sangat luas pada tegangan tinggi. Sifat tersebut antara lain sifat elektrik (resistivitas, losses, termal);	?				?	?	?		

	Evaluasi	sifat mekanik dan jenis bahan isolasi ( udara, SF6 dan minyak trafo) Evaluasi dirancang sedemikian rupa sehingga peserta diklat mampu menguasai tentang konsep isolasi pada bahan listrik								
	c. Materi 3	Pada bagian ke tiga dibahas secara lengkap tentang bahan konduktor yang meliputi (aluminium, tembaga, baja, wolfram, bimetal dan bahan dg resistivitas tinggi)		?				?	?	?
	Evaluasi	Dari evaluasi diharapkan siswa mampu mempunyai kompetensi dasar tentang aplikasi bahan-bahan konduktor pada tegangan tinggi.								
	d. Materi 4	Pada bagian ke 4 uraian modul diarahkan pada analisis bahan-bahan konduktor yang digunakan pada tegangan tinggi antara lain : kaca, sitol dan porselen.		?				?	?	?
	Evaluasi	Evaluasi dikembangkan dalam rangka peningkatan kualifikasi kompetensi siswa dalam hal pemahaman konsep isolator								
	e. Materi 5	Pada bagian terakhir modul ini siswa diharapkan memiliki gambaran awal tentang gejala medan tinggi pada bahan listrik.		?				?	?	?
	Evaluasi	Evaluasi yang dilakukan ditekankan pada pemahaman umum tentang gejala medan tinggi yang sering dialami oleh bahan-bahan listrik.								