

## KAJIAN BAHAN ISOLATOR UNTUK TEGANGAN TINGGI MBE LATEKS

Elin Nuraini, Suyamto, Darsono

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, PTAPB-BATAN Yogyakarta  
 Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 YKBB Yogyakarta 55281, Telepon ; (0274) 488435, 484436  
 e-mail: elin@batan.go.id

### ABSTRAK

**KAJIAN BAHAN ISOLATOR UNTUK TEGANGAN TINGGI MBE LATEKS.** Telah dilakukan kajian berbagai jenis bahan isolator untuk tegangan tinggi pada MBE (Mesin Berkas Elektron) lateks. Dalam tegangan tinggi MBE terdapat banyak masalah yang erat kaitannya dengan masalah isolasi sehingga penentuan isolator merupakan kajian yang penting dan perlu dilakukan pengujian sebelum dipakai. Hal ini bertujuan untuk menghindari kemungkinan terjadinya discharge maupun short circuit pada bagian-bagian yang bertegangan agar tidak terjadi kegagalan isolasi yang dapat mengakibatkan terjadinya gangguan operasi bahkan kerusakan MBE secara keseluruhan. Dalam kajian ini disajikan beberapa permasalahan penyekatan pada bagian sumber tegangan tinggi MBE yaitu pada transformator dan pelipat tegangan, kemudian dilakukan bahasan isolator yang dipakai. Pada transformator dipakai berbagai macam isolator bahan padat untuk penyekatan antar gulungan dan bahan cair untuk penyekatan antara kumparan dan body. Untuk penyekatan antara komponen pelipat tegangan dan body digunakan bahan gas SF<sub>6</sub> sebagai isolator

Kata kunci: isolator, sumber tegangan tinggi, MBE

### ABSTRACT

**REVIEW OF INSULATOR MATERIAL FOR HIGH VOLTAGE OF EMB LATEX.** A review of high voltage source insulators for EBM (electron beam machine) latex have been carried out for various types. In high voltage EBM there are many problems that are closely related to the insulation thus the determination of insulators is an important study and needs to be tested before use. It aims to avoid the possibility of discharge and short circuit the voltage parts in order to avoid failure of insulation which may result in disruption of operations, even damage the overall EBM. This review presents some problems of insulation on the part of high-voltage source EBM in the voltage transformer and voltage multiplier, then carried the discussion of insulators used. A transformer uses a variety of solid insulating material for insulation between the windings and liquid materials for the insulation between the coil and the body. For insulation between the components of voltage multiplier and body SF<sub>6</sub> gas is used as an insulator

Key words: insulator, high voltage source, EBM

### PENDAHULUAN

Isolasi adalah salah satu dari beberapa persoalan yang penting dalam teknik listrik khususnya pada pengoperasian tegangan tinggi. Pada peralatan-peralatan pemercepat partikel (*particle accelerator*) seperti MBE (Mesin Berkas Elektron) selalu digunakan tegangan tinggi. Oleh sebab itu dalam pengoperasian peralatan tersebut terkait dengan persoalan tegangan tinggi misalnya teknik pembangkitan, sistem keselamatan dan isolator. Isolator merupakan bagian yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Isolator sangat diperlukan untuk memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan sehingga antara penghantar tersebut tidak terjadi lompatan listrik atau percikan. Seperti umumnya isolator, isolator pada tegangan tinggi juga dikelompokkan menurut jenis bahannya yaitu bentuk

padat misalnya kertas, nylon, Plexiglas, bentuk gas misalnya SF<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> dan bentuk cair misalnya oli trafo, oli silikon. Di PTAPB-BATAN Yogyakarta saat ini sedang dilakukan kegiatan rancangbangun MBE sehingga perlu didukung oleh berbagai bidang penelitian yang terkait dengan isolator tegangan tinggi. Pada makalah ini dikaji jenis bahan isolator tegangan tinggi MBE dengan tujuan untuk memperoleh informasi jenis material apa saja yang sesuai dan dapat digunakan sebagai penyekat bagian-bagian yang bertegangan tinggi pada MBE.

### METODOLOGI

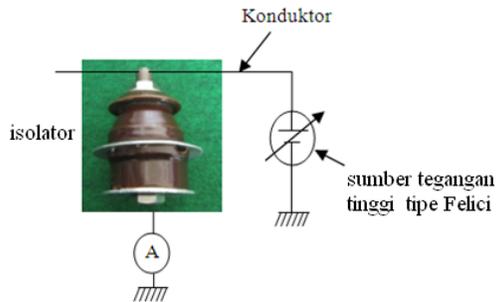
#### Studi pustaka

Mencari informasi lewat buku-buku pustaka, jurnal, dan internet.

### Cara Pengukuran Tegangan Dadal *Bushing*

Pada pengujian tegangan dadal *bushing* tegangan tingginya menggunakan sumber tegangan tinggi generator neutron (tipe Felici). Langkah-langkah cara pengujiannya sebagai berikut:

1. Meletakkan benda uji (*bushing*) yang akan di uji sesuai gambar berikut:



2. Menaikkan tegangan secara pelan-pelan sampai terjadi dadal tegangan yang ditandai dengan adanya arus pada ampermeter. Sebagai contoh pada *bushing* primer pada 12 kV arus bocor sudah ada (5  $\mu$ A), maka percobaan dihentikan, karena data tegangan dadal sudah diperoleh.

### Cara Pengujian Tegangan Tembus Trafo

Daya tahan isolasi dari suatu bahan media isolasi (zat cair) diuji dengan cara mengamati sampai sejauh mana bahan isolasi dapat menahan tegangan yang dikenakan pada suatu pasangan elektrode pengujian dengan sela (*gap*) tertentu yang dipasang didalam bahan isolator yang diuji tersebut.

### Langkah-langkah Cara Pengujian Tegangan Tembus

Sebelum mengoperasikan alat uji terlebih dahulu perlu dimahaminya prosedur pelaksanaannya guna menjamin keamanan:

1. Mempersiapkan alat dan memastikan keadaan alat siap digunakan.
2. Membuka penutup *cashing* dengan cara memutar knop pengunci.
3. Melepas dan bersihkan kotak uji kemudian mengisi penuh cuplikan media zat cair (minyak trafo) yang akan di uji agar elektrode lucutan tercelup.
4. Memasukkan kotak uji pada dudukan *slot* elektrode.
5. Mengatur magnetik motor sampai pengaduk berputar kontinyu.
6. Menutup kembali *cashing* dan putar *knop* pada posisi mengunci.

7. Mengecek lampu indikator *ready* menyala, untuk menyatakan alat siap dioperasikan
8. Menekan tombol *on*, amati parameter kenaikan tegangan pada tampilan monitor, bila sudah terjadi dadal tegangan parameter tegangan akan berhenti, nilai ini menunjukkan besarnya tegangan tembus dari media zat cair.
9. Mengulangi proses tersebut sampai 6 kali ulangan dengan menekan tombol reset dilanjutkan menekan tombol *on*.
10. Mencatat dan mengamati hasil parameter tegangan.

### Sifat Isolator Yang Baik

Agar isolator dapat melaksanakan fungsinya dengan baik harus mempunyai sifat listrik, mekanis, termis dan sifat kimia yang baik. Dari sifat-sifat tersebut, sifat listrik merupakan sifat yang paling penting suatu isolator dan hal ini ditunjukkan oleh kekuatan dielektrisnya atau resistivitasnya.

#### Sifat listrik

Sifat listrik merupakan sifat yang paling penting dari sebuah isolator dan hal ini ditunjukkan oleh kekuatan dielektrisnya yang identik dengan tahanan jenisnya. Di sini kuat dielektrik adalah merupakan kemampuan memisahkan antara bagian-bagian yang berarus atau bertegangan, bagian yang bertegangan dengan *body* maupun bagian yang bertegangan dengan tanah (*ground*). Isolator yang baik harus mempunyai tahanan jenis yang besar. Bahan isolator juga sering disebut sebagai bahan dielektrik, sehingga isolator yang baik harus mempunyai kuat dielektrik yang besar.

#### Sifat mekanis

Isolator yang baik harus mempunyai kekuatan mekanik yang baik. Termasuk dalam kuat mekanik tersebut antara lain tahan terhadap tekanan mekanik dan tidak mudah aus yaitu kerusakan yang disebabkan oleh pemakaian, kaitannya dengan kualitas bahan yang dipakai.

#### Sifat termis

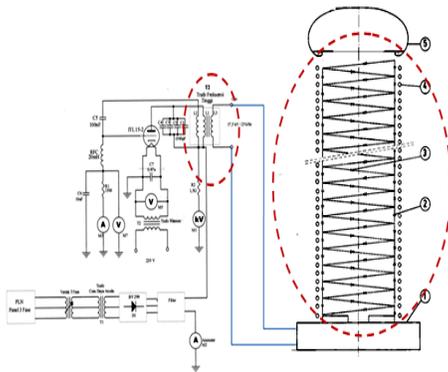
Suatu isolator yang baik harus tahan terhadap panas, baik panas yang berasal dari dalam yang diakibatkan oleh arus listrik maupun panas dari luar atau dari lingkungan sekitar. Akibat dari panas yang tinggi dapat mengubah susunan kimia dari bahan isolator sehingga dapat menurunkan kuat dielektriknya. Maka adanya panas tidak boleh melemahkan kekuatan dielektriknya secara berlebihan atau bahkan merusak bahan penyekat tersebut.

#### Sifat kimia

Termasuk sifat kimia pada isolator adalah sifat higroskopis, yaitu sifat yang menunjukkan mudah dan

tidaknya suatu bahan isolator menyerap air. Karena air merupakan bahan yang konduktif, maka semakin basah suatu isolator, tahanan jenisnya atau kuat dielektriknya akan mengecil dan kemampuan isolasinya akan turun. Jadi isolator yang baik harus mempunyai sifat tidak higroskopis. Sifat kimia yang lain adalah sifat mudah berkarat yang disebabkan oleh kondisi lingkungan seperti gas, garam, alkali dan sebagainya.

Seperti diketahui bahwa di dalam MBE lateks yang sedang dirancbangun dipakai tegangan tinggi jenis Cockcroft-Walton seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Pada tegangan tinggi tersebut terdapat dua bagian atau komponen atau peralatan bertegangan tinggi yang harus mendapatkan perhatian khusus terhadap isolasinya yaitu pada transformator dan pada pelipat tegangan. Oleh sebab itu kajian isolator ini difokuskan pada kedua peralatan tersebut.



**Gambar 1. TFT pada STT jenis Cockcroft-Walton MBE Lateks.**

**Isolator Pada Transformator**

Transformator pada tegangan tinggi MBE dioperasikan pada tegangan dan frekuensi tinggi sehingga harus dipakai inti dari bahan ferit. Dalam hal isolasi tegangan tinggi digunakan bahan isolator seperti pada umumnya yaitu padat, cair dan gas di mana bagian-bagian yang yang harus diisolasi adalah:

**1. Isolasi antara belitan atau gulungan (*winding*)**

Pada trafo tegangan tinggi khususnya pada kumparan sekunder, tegangan antar belitannya dapat mencapai orde 5 kV, oleh sebab itu isolasi pada bagian tersebut harus mendapatkan perhatian yang serius. Berdasarkan pengalaman, tidak jarang pada bagian inilah yang sering mengalami gangguan hubung singkat yang dapat mengakibatkan kegagalan beroperasinya trafo ataupun kegagalan beropersinya MBE secara keseluruhan. Untuk menyalurkan arus pada trafo berdaya besar belitan atau gulungan harus mempunyai ukuran yang besar sehingga sering dipakai kawat *bundle* yaitu gabungan beberapa kawat tunggal yang diikat menjadi satu. Untuk isolasi antar kawat hanya

dipakai isolasi email, sedangkan untuk isolasi antara belitan atau *bundle* dapat digunakan *diamond paper* atau prespan atau di sini digunakan plastik mika (PTFE) (Gambar 2).[1]



**Gambar 2. Isolasi gulungan (a) primer, (b) sekunder.**

**2. Isolator antara kawat keluaran dengan *casing***

Trafo frekuensi tinggi (TFT) pada MBE lateks didesain beroperasi pada tegangan 7 kV/17,5 kV (tegangan masukan pada trafo 7 kV dan tegangan luaran 17,5 kV. Untuk mengisolasi antara kawat kumparan yang keluar dari trafo dengan *body*, baik di sisi primer maupun sekunder digunakan *bushing* yang ada di pasaran (Gambar 3).



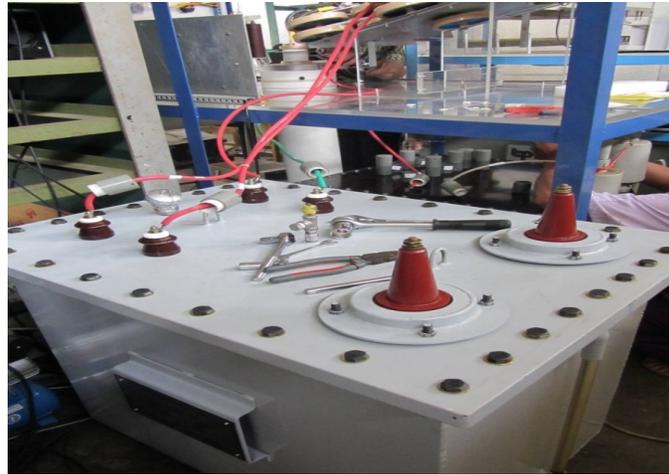
(a)



(b)

**Gambar 3. Bushing (a) Primer, (b) Sekunder.**

Bahan dari isolator tersebut adalah isolasi keramik untuk sekunder, dan di dalamnya diberi pipa dari bahan alumina dengan harapan tegangan dadalnya tinggi, sedangkan untuk primer dipakai *bushing* dari bahan *polyethilen*, (Gambar 4).



**Gambar 4.** *Bushing primer dan sekunder pada trafo frekuensi tinggi yang terintegrasi dengan osilator daya RF.*

Hasil pengukuran tegangan dadal bahan dan bushing ditunjukkan pada Tabel 1.[2]

**Tabel 1.** Hasil pengujian tegangan dadal bahan dan *bushing*.

No.	Bahan Isolator	Metode pengujian	Tegangan dadal* (kV)	Keterangan
1	Teflon, pejal bulat, berlubang, $\phi_o : 50 \text{ mm}$ , $\phi_i : 6 \text{ mm}$ , $L : 120 \text{ mm}$	elektroda pipa tembaga	15	* pada saat muncul arus bocor sebesar $5 \mu\text{A}$
2	Alumina, bentuk pipa, $\phi_o : 10 \text{ mm}$ , $\phi_i : 6 \text{ mm}$ , $L : 120 \text{ mm}$	elektroda pipa tembaga	25	
3	<i>Bushing primer, polyethilen</i>	Lihat Gambar 1	12	
4	<i>Bushing sekunder, keramik</i>	Lihat Gambar 1	17	

3. Isolator antara kumparan primer maupun sekunder terhadap inti trafo

Pada trafo tegangan tinggi khususnya pada daerah sekunder mempunyai *electrical field stress* yang sangat tinggi. Oleh sebab itu untuk bobin atau koker kumparan primer maupun sekunder, digunakan bahan plexiglas karena disamping mempunyai banyak pilihan tebal yang sesuai dengan kebutuhan dibandingkan dengan bahan *vertinex*, juga dapat berlaku sebagai isolator yang baik (Gambar 5 dan Tabel 2).[2; 3]

4. Isolator antara gulungan dan inti trafo dengan rumah trafo (*casing*)

Beda tegangan antara kumparan terhadap *body* dapat mencapai puluhan kV tergantung trafo yang dibuat. Jarak terdekat komponen gulungan dan inti trafo terhadap casing merupakan titik kritis terjadinya *discharge* atau lompatan bunga api

sehingga tahanan isolasinya merupakan batasan minimum yang harus dipenuhi. Untuk mengisolasi bagian ini digunakan minyak trafo merk DIALA B.



**Gambar 5.** Koker primer dan sekunder dari bahan plexiglas.

**Tabel 2. Kuat dielektrik  $k_d$  dan tegangan dadal  $V_d$  berbagai macam isolator bahan padat.**

No	Bahan isolator	Kuat dielektrik ( $k_d$ )	Tegangan dadal $V_d$ (kV/cm)
1	Karet	2,94	-
2	Teflon	2	-
3	Plexiglass	3,4	-
4	Vinil	3,18	-
5	Pholytelin	2,25	-
7	Mika	3 - 6	-
8	Gelas kuarsa	3,8	600
9	Kaca	3,8 – 6,9	2500
10	MgO (polikristal)	9,3	100
11	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (polikristal)	9,5	100-300
12	TiO <sub>2</sub> (polikristal)	96	20-120
13	BaTiO <sub>3</sub>	1200-1500	120

Keterangan:  $k_d$  pada suhu kamar

Minyak transformator adalah minyak mineral yang diperoleh dengan pemurnian minyak mentah. Dalam pemakaiannya, karena pengaruh panas dari rugi-rugi di dalam transformator akan timbul hidrokarbon di dalam minyak. 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 dadal atau tembus yang tinggi. Sebagian besar trafo tenaga, kumparan-kumparan dan intinya direndam dalam minyak-trafo, terutama trafo-trafo tenaga yang berkapasitas besar, karena minyak trafo mempunyai sifat sebagai media pemindah panas dengan cara disirkulasi dan bersifat pula sebagai isolasi dengan daya tegangan tembus tinggi sehingga berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Panas mengalir melalui media oli pendingin secara konveksi bebas, melalui casing transformator secara konduksi dan melalui lingkungan secara konveksi bebas, sehingga, didapatkan jenis pendinginan tipe ONAN (Oil Natural Air Natural).

Minyak trafo yang berlaku sebagai isolator dan pendingin harus memenuhi beberapa persyaratan: [4]

- Kekuatan isolasi tinggi.
- Penyalur panas yang baik memiliki berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
- Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik.
- Titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yang dapat membahayakan.
- Tidak merusak bahan isolasi padat.

- Sifat kimia yang stabil.

Di samping persyaratan di atas, sifat-sifat listrik yang menentukan unjuk kerja cairan minyak sebagai isolasi adalah:

- Breakdown withstand* yaitu kemampuan untuk tidak mengalami ketembusan dalam.
- Kondisi tekanan listrik (*electric stress*) yang tinggi.
- Kapasitansi listrik per unit volume yang menentukan permitivitas relatifnya.
- Minyak petroleum oli merupakan substansi nonpolar yang efektif karena merupakan campuran cairan hidrokarbon. Minyak ini memiliki permitivitas sekitar 2 atau 2,5. Ketidakbergantungan permitivitas substansi nonpolar pada frekuensi membuat bahan ini lebih banyak dipakai dibandingkan dengan bahan yang bersifat polar. Misalnya air memiliki permitivitas 78 untuk frekuensi 50 Hz, namun hanya memiliki permitivitas 5 untuk gelombang mikro.
- Faktor daya disipasi dari minyak di bawah tekanan bolak balik dan tinggi akan menentukan unjuk kerjanya karena dalam kondisi berbeban terdapat sejumlah rugi-rugi dielektrik. Faktor disipasi sebagai ukuran rugi-rugi daya merupakan parameter yang penting bagi kabel dan kapasitor. Minyak transformator murni memiliki faktor disipasi yang bervariasi antara  $10^{-4}$  pada 20° C dan  $10^{-3}$  pada 90° C pada frekuensi 50 Hz
- Resistivitas suatu cairan dapat digolongkan sebagai isolasi cair bila resistivitasnya lebih besar dari 109 W-m. Pada sistem tegangan tinggi resistivitas yang diperlukan untuk material isolasi adalah 1016 W-m atau lebih.[5]

**Tabel 3. Beberapa karakteristik dielektrik isolator cair.[6]**

No.	Karakteristik	Minyak trafo	Minyak kabel	Minyak capasitor	Minyak PETEP	Minyak silikon
1.	Tegangan dadal pada suhu 20 °C jarak 2,5 mm	15 kV/mm	30	20	> 15	30-40
2.	Permitivitas relatif (50 Hz) Tan $\delta$ (50 Hz) (1 kHz)	2,2-2,3 0,001 0,0005	2,3-2,6 0,002 0,0001	2,1 0,25×10 <sup>-3</sup> 0,10×10 <sup>-3</sup>	2,7 0,25×10 <sup>-3</sup> 0,10×10 <sup>-3</sup>	2-73
3.	Resistivitas (Ohm-m)	10 <sup>12</sup> - 10 <sup>13</sup>	10 <sup>12</sup> - 10 <sup>13</sup>	10 <sup>12</sup> - 10 <sup>14</sup>	> 10 <sup>14</sup>	3 × 10 <sup>14</sup>
4.	Berat jenis pada 20 °C	0,89	0,93	0,88 - 0,89	0,96 - 0,97	1,0 - 1,1
5.	Viskositas pada 20 °C (CS)	30	30	30	80	10 - 100
6.	Nilai keasaman (mg/gm KOH)	Nil	Nil	Nil	<0,03	Nil
7.	Indeks bias	1,4820	1,4700	1,4740	1,4555	1,5-1,6
8.	Saponification (mg KOH/gm minyak)	0,01	0,01	0,01		< 0,01
9.	Ekspansi termal (20-100 °C)	7 × 10 <sup>-4</sup> /°C	7 × 10 <sup>-4</sup> /°C	7 × 10 <sup>-4</sup> /°C	0,00075	5 × 10 <sup>-4</sup> /°C
10.	Kadar air yang diijinkan (ppm)	50	50	50	200	< 30

Dari Tabel 3 terlihat bahwa minyak trafo bersifat sebagai penyalur panas yang baik memiliki berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat serta harganya lebih murah dibandingkan dengan minyak silikon, akan tetapi minyak silikon mempunyai kelebihan tahan oksidasi, stabil terhadap suhu tinggi bahkan sampai 1500 °C *chlorinated hydrocarbon* tidak diproduksi karena beracun. Minyak PETEP tegangan dadalnya hampir sama dengan oli trafo dan *Hight Temperatur Hydrocarbon* (HTH) oil sebenarnya mempunyai sifat sebagai isolasi listrik yang baik, akan tetapi mempunyai kemampuan transfer panas jelek, biasanya sebagai campuran minyak trafo. Pada trafo ini digunakan minyak trafo merk DIALA B yang hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4 dan 5.

Hasil pengujian kualitas tegangan tembus dari sampling yang dilakukan sebelum dipurifikasi untuk kedua jenis merk minyak trafo DIALA B dan TOTAL, masing-masing nilai tegangan tembus rata-ratanya adalah: 15,06 kV/2,5 mm dan 33,06 kV/2,5 mm. Perhitungan pada udara secara konveksi bebas, menghasilkan koefisien perpindahan panas (*h*) sebesar 12,154 W/m<sup>2</sup>K.

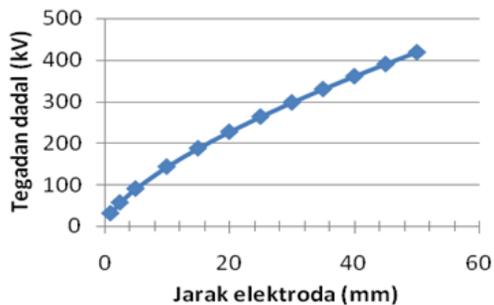
**Tabel 4. Hasil pengujian tegangan tembus minyak trafo merk TOTAL.**

No	Tegangan dadal (kV/2,5 mm)		Keterangan
	Sebelum dipurifikasi	Setelah dipurifikasi	
1	30,5	83,5	Jarak elektrode (R) = 2,5 mm Waktu pengujian (t) = 1 menit Kenaikan tegangan = 3 kV/detik
2	34,9	68,7	
3	30,7	81,8	
4	33,2	68,1	
5	30,7	67,2	
6	38,4	82,9	
	Rata-rata = 33,06	Rata-rata = 74,8	

**Tabel 5. Hasil pengujian tegangan tembus minyak trafo merk DIALA B.**

No	Tegangan Dadal (kV/2,5 mm)		Keterangan
	Sebelum dipurifikasi	Setelah dipurifikasi	
1	14,7	75,0	Jarak elektrode (R) = 2,5 mm Waktu pengujian (t) = 1 menit Kenaikan tegangan = 3 kV/detik
2	13,3	70,1	
3	14,1	73,0	
4	18,7	72,9	
5	13,0	73,2	
6	16,3	72,7	
	Rata-rata= 15,016	Rata-rata= 72,7	

Setelah dilakukan purifikasi pada minyak, daya dielektrikum menjadi lebih tinggi, hasil nilai rata-rata tegangan tembus adalah 62,48 kV/2,5 mm untuk merk DIALA B dan 74,8 kV/2,5 mm untuk merk TOTAL. Adapun karakteristik minyak trafo yang digunakan seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



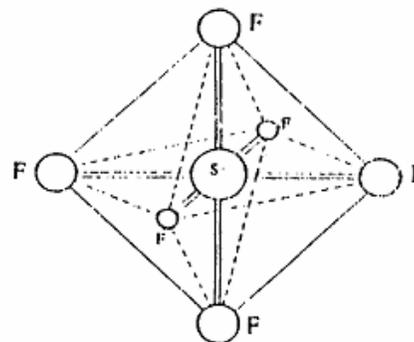
**Gambar 6. Karakteristik tegangan dadal oli trafo STT-MBE.**

**Isolator Pada Pelipat Tegangan**

Seperti diketahui bahwa tegangan yang terjadi pada peralatan pelipat tegangan semakin tinggi pada tingkat pelipatan yang paling atas. Keluaran tegangan yang paling tinggi terjadi disisi paling atas dari konstruksi pelipat tegangan. Peralatan pelipat tegangan tersebut dimasukkan ke dalam suatu tabung yang di dalamnya berisi isolator bahan gas yaitu SF<sub>6</sub> yang bertekanan tinggi yaitu sebesar 5 bar.

*Sulfur Hexa Fluorida* (SF<sub>6</sub>) merupakan suatu gas bentukan antara unsur sulfur dengan fluor dengan reaksi eksotermis  $S + 3 F_2 \rightarrow SF_6 + 262 \text{ kilo kalori}$  dan molekul SF<sub>6</sub> seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Terlihat pada Gambar 7 bahwa molekul SF<sub>6</sub> mempunyai 6 atom fluor yang mengelilingi sebuah atom sulfur, di sini masing-masing atom fluor meng-

ikat 1 buah elektron terluar atom sulfur. 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 °C 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 6.



**Gambar 7. Molekul sulfur hexa fluoride.**

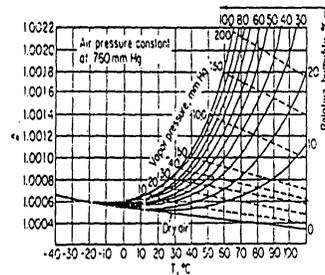
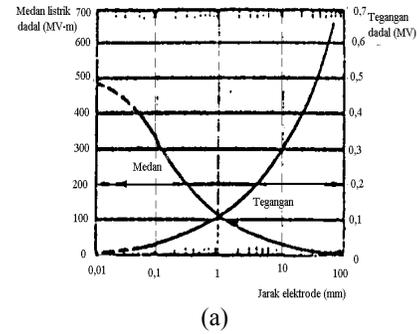
**Tabel 6. Perbandingan SF<sub>6</sub> dengan beberapa gas lain.**

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
Hydrogen	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 sulfur dan fluor memerlukan panas dari sekelilingnya sebesar 262 kilokalori/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

1. 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.
2. Tekanan SF<sub>6</sub> sebagai pemadam busur api maupun sebagai pengisolasi dapat dengan mudah dideteksi.
3. Penguraian pada waktu memadamkan busur api maupun pembentukannya kembali setelah pemadaman adalah menyeluruh (tidak ada sisa unsur pembentuknya).
4. 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.
5. Karakteristik gas SF<sub>6</sub> adalah elektro negatif sehingga penguraiannya menjadikan dielektriknya naik secara bertahap.
6. Transien frekuensi yang tinggi akan naik selama operasi pemutusan dan dengan adanya hal ini busur api akan dipadamkan pada saat nilai arusnya rendah.

Bahan isolator gas selain SF<sub>6</sub>, udara juga merupakan bahan isolator yang paling banyak digunakan terutama pada jaringan listrik. Pada tegangan yang tidak terlalu tinggi, udara merupakan penyekat yang baik, namun bila tegangannya terlalu besar akan terjadi loncatan arus melalui udara. Besarnya tegangan dadal atau tegangan tembus (*breakdown voltage*) untuk udara adalah 3 – 5 kV/mm. Karena sifatnya, tegangan dadal isolator udara merupakan hal yang sangat penting karena besarnya sangat tergantung pada tekanan dan jarak elektroda. Pada Gambar 8 ditunjukkan tegangan dadal ruang hampa sebagai fungsi jarak atau spasi dari elektroda, sedangkan pada Gambar 8 ditunjukkan perubahan kuat dielektrik isolator udara sebagai fungsi kelembaban (*humidity*) dan suhu. Besarnya kuat dielektrik dari udara adalah 1,0006, sedangkan untuk udara hampa besarnya sama dengan 1 (satu) sehingga kadang-kadang diambil pendekatan bahwa konstanta dielektrik udara sama dengan konstanta dielektrik ruang hampa. Begitu juga permitivitas udara, besarnya diambil sama besar dengan permitivitas ruang hampa yaitu  $8,854 \cdot 10^{-12}$  F/(m.coulomb<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>).



**Gambar 8. (a) Grafik tegangan dadal ruang hampa sebagai fungsi jarak elektroda, (b) Grafik perubahan kuat dielektrik udara terhadap perubahan kelembaban dan suhu.[3]**

## KESIMPULAN

Dalam tegangan tinggi MBE terdapat banyak masalah yang erat kaitannya dengan masalah isolasi sehingga penentuan isolator merupakan kajian yang penting sehingga perlu dilakukan pengujian sebelumnya sebelum dipakai. Dalam tegangan tinggi MBE yang telah dibuat, pada bagian transformator dipakai isolator minyak trafo merk DIALA B dengan tegangan dadal rata-rata 6,00 kV/mm sebelum dipurifikasi dan 29,08 kV/mm setelah dipurifikasi. Sedangkan untuk *bushing* primer dan sekunder masing-masing mempunyai tegangan dadal 12 kV dan 17 kV. Untuk isolator pada bagian pelipat tegangan digunakan SF<sub>6</sub> dengan tegangan dadal 7,5 – 12,5 kV/mm pada tekanan 1 atmosfer.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] DARSONO, Peran Teknologi Akselerator Dalam Mendukung Industri, Prosiding PPI Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, Vol.10, Oktober 2008, PTAPB-BATAN.
- [2] SUYAMTO dkk, Rancangbangun Transformator Frekuensi Tinggi Untuk Sumber Tegangan Tinggi Cockcroft Walton –MBE. Proposal Program Insentif PI-PKPP 2012.

- [3] SUYAMTO, Fisika Bahan Listrik, Cetakan 1, Penerbit Pustaka Pelajar, Yogyakarta, Agustus 2008, ISBN : 978-602-8300-91-9
- [4] www.elektroindonesia.com, "Sifat isolator yang baik", 2007.
- [5] www.elektroindonesia.com, " Persyaratan sifat-sifat listrik untuk isolasi Cair", 2009.
- [6] MS NAIDU, V KAMARAJU, *Engineering High Voltage*, fourth edition tata Mc Graw-Hill Publishing Company Limited.

---

## TANYA JAWAB

### Dewanto

- Cara/teknik pengujian tegangan dadal pada isolasi belitan (*winding*)?
- Plexiglas® adalah isolator terbaik dibandingkan dengan material apa?

### Elin Nuraini

- Teknik pengujian tegangan dadal pada isolasi belitan/*winding* sebagai berikut:
  1. Bundel konduktor (*winding*) tiap kawat dikupas emailnya.
  2. Tegangan tinggi dikenakan pada konduktor, sedangkan isolatornya *diground* melalui ampermeter.
  3. Tegangan tinggi dinaikkan perlahan-lahan sampai ampermeter menunjukkan arus yang mengindikasikan bahwa isolator telah gagal atau dadal.
- Plexiglas® merupakan isolator terbaik dibandingkan dengan bahan isolator karet dan teflon yang

mempunyai kuat dielektrik 2,94 dan 2, sedang untuk bahan Plexiglas® mempunyai kuat dielektrik 3,4.

### Indah K.

- Minyak isolator berasal dari bahan apa?
- Bahan isolator padat, cair, gas berasal dari apa?

### Elin Nuraini

- Minyak isolator yang digunakan pada transformator adalah minyak mineral yang diperoleh dengan pemurnian minyak mentah. Dan di sini minyak trafo yang digunakan minyak trafo merk DIALAB.
- Bahan isolator padat yang digunakan :
  - Untuk isolasi antara belitan (*winding*) digunakan diamond paper atau prespan, dan khusus pada penelitian ini digunakan plastik mika.
  - Isolator antara kawat keluaran dengan casing untuk bushing primer digunakan isolasi dari bahan polyethilen, sedang pada sekunder digunakan isolasi padat dari bahan keramik.
  - Isolator antara kumparan primer dan sekunder terhadap inti trafo digunakan isolasi padat dari bahan Plexiglas®.
- Bahan isolator cair menurut literatur diantaranya minyak trafo, minyak kabel, minyak kapasitor, minyak PEREP dan minyak silikon. Akan tetapi pada penelitian ini digunakan minyak trafo merk DIALAB karena minyak trafo bersifat sebagai penyalur panas yang baik dan harganya lebih murah dibanding minyak silikon.
- Bahan isolasi gas ada beberapa diantaranya udara, N<sub>2</sub>, karbondioksida, hidrogen dan gas SF<sub>6</sub>. Pada penelitian ini digunakan gas SF<sub>6</sub> dengan alasan gas SF<sub>6</sub> tidak beracun, tidak larut dalam air dan mempunyai daya isolasi 2,5 kali kemampuan isolasi udara.