

**ANALISIS TEGANGAN TINGGI  
PADA PESAWAT SINAR-X**Sujatno, Sigit Bachtiar  
PRPN-BATAN Kawasan Puspipetek - Serpong**ABSTRAK**

**ANALISIS TEGANGAN TINGGI PADA PESAWAT SINAR-X.** Telah dilakukan analisis terhadap tegangan tinggi pesawat sinar-X. Tujuannya adalah untuk mengetahui karakteristik dan konstruksi yang digunakan sebagai pembangkit. Alat yang digunakan untuk membangkitkan tegangan tinggi bolak balik frekuensi rendah ialah sebuah transformator. Transformator tegangan tinggi mempunyai perbandingan jumlah lilitan sekunder lebih besar daripada primernya sehingga tegangan yang dihasilkan dapat mencapai beberapa ratus ribu Volt (30 kV-500 kV). Agar efisien dan ekonomis maka untuk tegangan tinggi diatas 100 kV digunakan beberapa trafo yang diseri yang disebut dengan model kaskade. Tegangan tinggi yang dihasilkan trafo kemudian disearahkan dan dicatukan pada tabung sinar-X. Tegangan ini akan mempercepat gerak elektron yang dihasilkan oleh filamen di dalam tabung, energi kinetik elektron digunakan untuk menumbuk anoda, sehingga menghasilkan sinar-X.

Kata Kunci : Sinar-X, Tegangan Tinggi, kaskade, Transformator

**ABSTRAC**

**AN ANALYSIS OF HIGH VOLTAGE X-RAY.** It has been done an analysis of the high voltage X-ray. The objective was to determine the characteristics and construction used as a generator. A tools that used to generate a high voltage alternating low-frequency is a transformer. The high voltage transformer has a secunder windings greater than a primer windings, so the voltage that be generated can reach several hundred thousand volts (30 kV-500 kV). To be efficient and economical, for a high voltage 100 kV is used several transformers are constructed in series that called a cascade. The high voltage that is generated then be rectified as a working voltage on the tube X-rays. This voltage will accelerate the movement of electrons produced by the filament in the tube, the kinetic energy of electrons is used to strike the anode, thus producing X-rays.

Keywords: X-rays, High Voltage, cascade, Transformer

**1. PENDAHULUAN**

Tegangan tinggi (*High Voltage*, HV) yaitu suatu tegangan listrik yang memerlukan perlakuan dan teknik-teknik khusus. Batasan kapan tegangan dapat dikatakan tinggi (HV), tinggi sekali (*Extra High Voltage*, EHV) dan sangat tinggi (*Ultra High Voltage*, UHV) dapat dikategorikan sebagai berikut, yaitu: HV dimulai dari 20-200 kV, EHV kira-kira mulai 220 kV dan UHV mulai 765 kV keatas.

Pada pesawat sinar-X diagnostik, umumnya tegangan tinggi yang digunakan antara 30 kV sampai 125 kV. Tegangan tinggi ini akan diterapkan antara katoda dan anoda dalam tabung sinar-X. Dengan tegangan tinggi dan adanya pemanasan filamen maka elektron yang lepas dari katoda dalam

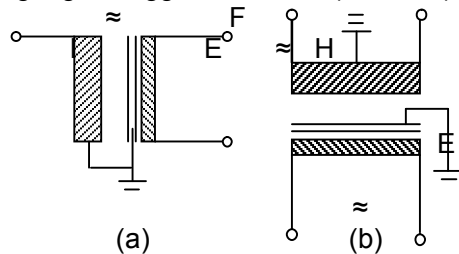
tabung dapat bergerak cepat menuju anoda, akibatnya terjadi tumbukan tak kenyal sempurna antara elektron dengan anoda (anoda sebagai target). Adanya tumbukan tersebut terjadilah peristiwa *Bremstrahlung* yang menghasilkan sinar-X. Tinggi rendahnya nilai tegangan akan memberikan kemampuan daya tembus dari sinar-X, semakin tinggi tegangannya maka daya tembus sinar-X terhadap ketebalan obyek semakin tinggi pula.

Untuk membangkitkan tegangan tinggi bolak balik frekuensi rendah diperlukan suatu komponen yaitu transformator (trafo) yang biasanya di bumikan pada salah satu ujung lilitannya, sehingga diperoleh tegangan keluaran yang simetris terhadap bumi. Dengan pertimbangan teknis dan ekonomis kini jarang digunakan hanya

sebuah trafo untuk membangkitkan tegangan di atas ratusan kV, tetapi digunakan beberapa trafo dengan menghubungkan lilitan tegangan tinggi secara seri atau kaskade. Pada susunan kaskade setiap trafo harus diisolasi terhadap tegangan-tegangan pada tingkat dibawahnya, dengan demikian lilitan eksitasi trafo pada setiap tingkat akan bekerja pada potensial yang tinggi. Untuk tegangan tinggi sampai 100 kV banyak digunakan isolasi resin epoksi, sedangkan untuk tegangan yang lebih tinggi digunakan minyak. Isolasi yang umum digunakan ialah minyak dengan penghalang isolasi dan kertas yang diresapi minyak trafo.

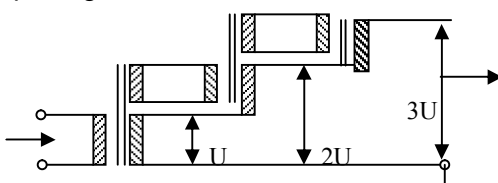
## 2. TEORI

Transformator untuk pembangkit tegangan tinggi bolak-balik biasanya dibumikan pada salah satu ujung lilitan tegangan tinggi. Dalam perkembangannya kini jarang digunakan sebuah transformator untuk membangkitkan tegangan di atas beberapa ratus kV. Sebagai penggantinya digunakan beberapa trafo dengan menghubungkan lilitan tegangan tinggi secara seri (kaskade).



Gambar 1. Trafo Satu Tingkat  
(a) Terisolasi pada satu kutub  
(b) Terisolasi penuh

Pada trafo susunan kaskade maka setiap trafo harus terisolasi terhadap tegangan pada tingkat dibawahnya. Trafo susunan kaskade seperti terlihat pada gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Trafo kaskade tiga tingkat

Bentuk tegangan fungsi waktu  $u(t)$  untuk tegangan tinggi bolak balik sering menyimpang dari bentuk sinus. Untuk pengujian tegangan tinggi besaran  $U/\sqrt{2}$  didefinisikan sebagai tegangan uji. Pada bentuk sinusoidal murni  $U/\sqrt{2} = U_{rms}$ , dengan catatan bahwa penyimpangan bentuk tegangan tinggi dari bentuk sinus masih dalam batas yang diijinkan.

Persamaan  $U_{rms}$  adalah :

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int u^2(t) dt} \quad (1)$$

Dimana :

T : Periode  
U : Tegangan

Kinerja trafo dapat dikaji secara pendekatan dengan menggunakan rangkaian ekuivalen yang terdiri atas impedansi hubung singkat  $R_1 + j\omega L$  dan kapasitansi total  $C = C_i + C_a$  pada sisi tegangan tinggi.  $U_1''$  merupakan tegangan sekunder yang dihasilkan oleh transformasi tegangan primer. Rangkaian ekuivalen ini berlaku untuk persamaan trafo berbeban dan berlaku juga untuk trafo susunan kaskade.

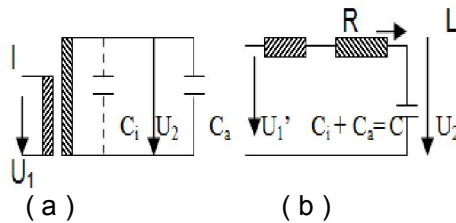
$$U_2 \approx U_1'' \times \frac{1}{1 - \omega^2 L C} \quad (2)$$

Nilai  $(1 - \omega^2 LC)$  selalu lebih kecil dari 1, maka jelas terlihat bahwa resonansi seri menghasilkan peningkatan kapasitif terhadap tegangan sekunder. Besar peningkatan tegangan dapat dihitung dari tegangan hubung singkat trafo ( $U_k$ ) sewaktu beban kapasitif  $C$  menyerap arus nominal ( $I_n$ ) pada tegangan nominal  $U_n$  dan frekuensi nominal.

$$U_k = \frac{I_n \omega L}{U_n} = \omega^2 L C \quad (3)$$

Dimana :

$U_k$  : Tegangan Hubung singkat  
 $U_n$  : Tegangan Nominal  
 $I_n$  : Arus nominal  
 $L$  : Induktansi  
 $C$  : Kapasitansi



**Gambar 3.** Kinerja Trafo

- (a) Diagram rangkaian  
(b) Rangkaian ekivalen

### 3. TATA KERJA

Bahan yang digunakan dalam penulisan makalah ini adalah trafo tegangan tinggi pada pesawat sinar-X diagnostik 100 mA / 100 kV, sedangkan alat yang digunakan adalah sebuah multimeter digital dan tool set.

### URUTAN KERJA

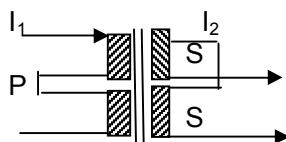
Untuk melakukan analisis trafo tegangan tinggi pada pesawat sinar-X maka perlu dilakukan kegiatan-kegiatan antara lain :

1. Mempersiapkan alat dan bahan yang akan dianalisa
2. Mempelajari gambar trafo tegangan tinggi pada pesawat sinar-X.
3. Mempelajari teori tentang trafo daya.
4. Menganalisis trafo sebagai sumber tegangan tinggi pada pesawat sinar-X
5. Melakukan perhitungan trafo tegangan tinggi.

### METODE

Tegangan tinggi merupakan sumber tegangan kerja untuk tabung pesawat sinar-X. Kapasitas pesawat sinar-X diagnostik yang akan dianalisa adalah 10 kVA, 100 mA /100 kV.

Bentuk gambar dari trafo tegangan tinggi adalah sebagai berikut :



**Gambar 4.** Trafo HV

Untuk mempermudah perhitungan biasanya dianggap sebagai trafo ideal, sehingga daya primer sama dengan daya sekundernya,  $P_1 = P_2$

Daya maksimum pesawat sinar-X ,  
 $P_1 = 10 \text{ kVA} = 10.000 \text{ VA}$

Arus maksimum  $I_2 = 100 \text{ mA}$  dan tegangan maksimum  $V_2 = 100 \text{ kV}$ . Menurut rumus transformator secara umum adalah :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$V_1, N_1, I_1$  = Tegangan, lilitan, arus primer  
 $V_2, N_2, I_2$  = Tegangan, lilitan, arus Sekunder

Jika di ambil  $\cos \phi = 1$ ,

$$P_1 = V_1 \times I_1$$

$$I_1 = P_1 / V_1$$

$$I_1 = 10.000 \text{ VA} / 220 \text{ V}$$

$$I_1 = 45,5 \text{ A}$$

$$N_1 \times I_1 = N_2 \times I_2$$

Jika  $N_1$  di ambil = 180 lilitan

$$\text{Maka } N_2 = \frac{N_1 \times I_1}{I_2}$$

$$N_2 = \frac{180 \times 45,5}{0,1}$$

$$N_2 = 81900 \text{ lilitan}$$

Karena  $V_1 / V_2 = 220/100.000$

Berarti :  $N_1/N_2 = 1 : 460$  lilitan

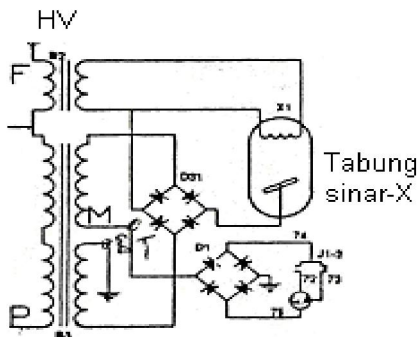
Jadi untuk pesawat sinar-X dengan daya 10 kVA, maka dibutuhkan transformator dengan lilitan primer: 180 dan lilitan sekundernya 81900.

Untuk transformator 100 kV atau lebih diusahakan cara pengisolasian yang ekonomis dan gradien tegangan yang seragam. Cara menggulung lilitan menurut Fortesque gulungan primer letaknya terdekat pada inti sedangkan gulungan sekundernya jauh dari inti. Secara konsentris dililitkan gulungan yang rendah tegangannya, kemudian dililitkan gulungan tegangan tinggi. Untuk mendapatkan gradien potensial yang seragam dilekatkan bahan penghantar (misalnya timah) pada tabung isolasi yang terletak di antara gulungan primer dan sekunder.

Semakin tinggi tegangan yang dihasilkan maka semakin tebal isolasi, semakin banyak material dan ruangan

trafo yang diperlukan. Untuk itu, pada pemakaian tegangan tinggi diatas 500 kV digunakan beberapa trafo yang dihubungkan secara kaskade.

Bentuk tegangan tinggi yang dibutuhkan untuk catu tegangan ke tabung sinar-X adalah tegangan tinggi searah (DC), untuk itu tegangan keluaran dari trafo disearahkan dengan menggunakan dioda bridge, rangkaian penyearahan seperti terlihat pada gambar 5.



**Gambar 5 :** Rangkaian penyearahan

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

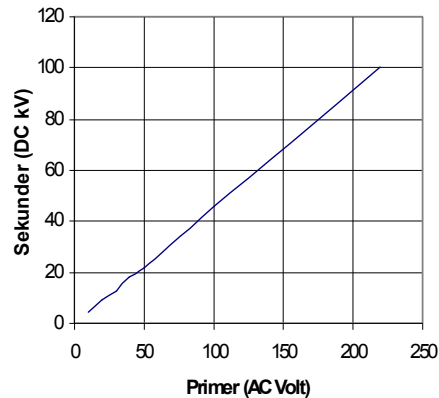
Hasil analisis dan perhitungan trafo tegangan tinggi untuk kapasitas 10 kVA atau setara 10 kW dengan tegangan tinggi 100 kV yang digunakan pada pesawat sinar-X Diagnostik seperti terlihat pada tabel. 1

**Tabel 1.** Hasil perhitungan Trafo

Primer			Sekunder			Daya
V	I	L	V	I	L	
220	45.5	180	100	100	81900	10 kVA
V	A	Lt	KV	mA	Lt	

**Tabel 2.** Hasil Pengujian Trafo

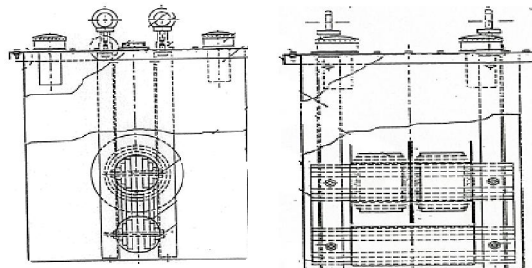
No	Primer AC(Volt)	Sekunder DC(kV)
1	10	4,2
2	20	9,1
3	30	12,5
4	40	18,2
5	50	21,7
6	100	45,5
7	220	100,1



**Gambar 6.** Gatik Pengujian Trafo

Trafo tegangan tinggi suhunya akan naik pada saat dioperasikan, maka dibutuhkan pendinginan, yang lazim dipakai adalah minyak trafo yang ditempatkan pada suatu tanki.

Trafo dengan isolasi minyak dapat dirancang dalam berbagai bentuk, antara lain kontruksi jenis tanki maka bagian aktif (inti dan kumparan) ditempatkan dalam wadah logam, sehingga memperbaiki pendinginan.



**Gambar 7:** Tanki Trafo HV

#### 5. KESIMPULAN

Hasil analisis trafo tegangan tinggi pada pesawat sinar-X diagnostik adalah sebagai berikut :

1. Pemakaian daya dari pesawat sebagian besar digunakan untuk pembangkitan tegangan tinggi yang korelasi dengan kekuatan daya tembus sinar-X, sehingga perhitungan kemampuan trafo menjadi cukup penting

2. Untuk pembangkitan sinar-X pada 100 mA dengan tegangan tinggi 100 kV, arus dari jaringan yang dipakai dapat mencapai 50 A walaupun hanya sesaat ketika penyinaran, ini menjadi pertimbangan perencanaan.
3. Sebetulnya trafo ideal dalam arti daya masuk sama dengan daya yang keluar tidak ada, karena pada trafo banyak terdapat kerugian-kerugian, misal rugi tembaga, rugi besi dan sebagainya.
4. Trafo tegangan tinggi akan efisien dan ekonomis, jika menggunakan lebih dari satu trafo secara kaskade, terutama untuk tegangan tinggi diatas 500 kV.
5. Pada konstruksi trafo tegangan tinggi yang perlu diperhatikan adalah

teknik isolasinya juga sistim pendinginan trafo untuk membuang panas yang ditimbulkan dalam trafo saat dioperasikan.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1.] ARTONO ARISMUNANDAR, Teknik Tegangan Tinggi, Pradnya Paramita, Jakarta, 1987.
- [2.] FRANK.D.PETRUZELLA, Elektronika Industri, Penerbit Andi. Jogjakarta, 1986
- [3.] SUMANTO, Teori Transformator, Penerbit Andi Jogjakarta, 1996
- [4.] THERAJA, B.L, A Texts Book of Electrical Technology, Bombay, Nirja Contruction and Development-Co, 1980