

RANCANGAN DAN SIMULASI SUMBER TEGANGAN TINGGI JENIS TRANSFORMATOR UNTUK MBE 300 keV/20 mA

Djasiman, Darsono, Suprpto
Puslitbang Teknologi Maju BATAN

ABSTRAK

RANCANGAN DAN SIMULASI SUMBER TEGANGAN TINGGI JENIS TRANSFORMATOR UNTUK MBE 300 keV/20 mA. Perancangan sumber tegangan tinggi (STT) jenis transformator dimaksudkan untuk mendukung program rancang-bangun MBE (mesin berkas elektron) 300 keV/20 mA oleh P3TM-BATAN. Substansi perancangan ini meliputi kriteria, dasar perhitungan dan simulasi rancangan. Hasil simulasi dengan mengacu pada kapasitas MBE 300 keV/20 mA menghasilkan spesifikasi teknis STT sebagai berikut: kapasitas STT 300 kV/50 mA; daya masukan 28,5 kVA, 3 fase 380 V; transformator 3 fase dengan tegangan primer per fase 220 V dan tegangan sekunder per fase 2x25 kV; pengganda tegangan 6x50 kV; dan media isolasi minyak.

ABSTRACT

DESIGN AND SIMULATION OF TRANSFORMER TYPE HIGH VOLTAGE POWER SOURCE FOR ELECTRON BEAM MACHINE OF 300 keV/20 mA. The aim of transformer type high voltage power supply design is to support the construction project of 300 keV/20 mA electron beam machine by P3TM BATAN. Essence of the matter are design criterions, calculation formulas and simulation. Result of simulation based on machine capacity give the technical specifications e.i: high voltage source capacity of 300 kV/50 mA; input power source of 28,5 kVA, 3 phase 380 V; 3 phase transformer with primary voltage of 220 V/phase and secondary voltage of 2x25 kV/phase; voltage multiplier of 6x50 kV; and insulation of oil.

PENDAHULUAN

Dalam rangka menunjang program BATAN tentang rancang bangun mesin berkas elektron (MBE) berbasis industri yaitu MBE untuk industri lateks, dilakukan kegiatan perancangan atas komponen-komponen sistem sebagai tahap awal. Selanjutnya dokumen hasil rancangan digunakan sebagai acuan dalam kegiatan fabrikasi komponen dan konstruksinya lebih lanjut. Kegiatan perancangan terbagi atas beberapa bagian sesuai katagori bagian-bagian utama MBE meliputi: sumber elektron, tabung pemercepat, sumber tegangan tinggi, sistem optik, sistem pemayar, *window*, sistem vakum, sistem instrumentasi dan kendali, bejana proses, sistem pendingin, perisai radiasi, dan lain-lain. Dalam makalah ini dikemukakan perancangan tentang salah satu bagian dari rincian tersebut yaitu sumber

tegangan tinggi (STT) untuk sistem pemercepatnya. Agar hasil rancangan mendekati pada makna yang semestinya, maka proses perancangan mengacu pada kriteria rancangan dimana dikemukakan hal-hal yang menjadi batasan sesuai kebutuhan. Selanjutnya dengan menggunakan beberapa rumusan sebagai dasar perhitungan sesuai kaedah-kaedah terkait dapat dilakukan penentuan nilai-nilai berbagai komponen yang diperlukan, dan akhirnya dengan memasukan data sesuai yang dikehendaki sebagai simulasi dapat dihasilkan suatu spesifikasi teknis atas sistem yang dikehendaki, dalam hal ini yaitu perhitungan untuk menghasilkan nilai-nilai yang mencirikan data spesifikasi teknis dari STT untuk MBE 300 keV/20 mA.

Program rancang bangun MBE untuk industri lateks ini direncanakan memiliki kapasitas 300 kV/20 mA atau 6 kW, daya

tersebut seluruhnya akan menjadi beban utama bagi STT yang mencatunya disamping bentuk beban-beban lain yang harus disangganya seperti daya untuk sumber elektron dan rugi-rugi daya lainnya. Disamping beban yang harus disangga tersebut, dalam perancangan juga harus mempertimbangkan perlunya keandalan unjuk kerja dan stabilitas serta faktor-faktor lain sesuai yang dikehendaki. Dalam program rancang bangun MBE ini telah ditentukan sebagai sumber tegangan pemercepatnya adalah STT jenis transformator, karena jenis ini memang sesuai sebagai sumber untuk MBE berdaya besar dan energi rendah^[1].

STT jenis transformator dibedakan menjadi 2 jenis yaitu jenis inti terbumikan (*grounded core transformer type* atau GCT) dan jenis inti terisolasi (*insulated core transformer type* atau ICT). Dalam GCT kumparan primer dan sekunder terisolasi langsung terhadap tegangan tinggi DC, sedangkan dalam ICT isolasi terhadap tegangan tinggi DC terbagi dalam beberapa tahap sesuai tingkat kumparan sekundernya, demikian juga inti trafo terbagi dan terisolasi pada setiap tingkat tegangannya.

Dalam jenis inti terbumikan (GCT) hubungan lintasan fluksi magnetnya sangat baik, sehingga dengannya dapat dibuat suatu STT yang mampu menyangga arus berkas elektron hingga 1000 mA, tetapi tegangannya terbatas sampai 1000 kV karena masalah isolatornya^[2]. Oleh karena keistimewaan dari hubungan lintasan fluksi magnet tersebut yang sangat baik sehingga efisiensi konversi dayanya dapat mencapai lebih dari 90 %^[1].

Untuk jenis inti terisolasi (ICT), inti trafo (transformator) terbagi dan terisolasi pada setiap tingkat tegangannya sehingga tidak diperlukan kekuatan isolator sebagaimana pada GCT. Karena itu jenis ICT dapat dibuat untuk tegangan yang lebih tinggi hingga 2000 kV, tetapi karena hubungan lintasan fluksi magnetnya kurang baik maka efisiensi konversi dayanya menjadi lebih rendah dibanding dengan jenis inti terbumikan (GCT)^[1]. Walaupun riak tegangan dari STT jenis transformator relatif lebih besar dari pada jenis Cockcroft-Walton dan atau Van de Graaff, namun kekurangan tersebut tidak menjadi kendala/masalah yang berarti dalam penggunaan untuk proses iradiasi lateks.

Pemilihan Jenis STT

Mengingat bentuk inti trafo yang utuh, maka fabrikasi dan konstruksi jenis GCT dipandang lebih sederhana dibanding jenis ICT yang terpotong-potong. Kemudian memperhatikan kelebihan dan kekurangan dari jenis-jenis sumber tegangan tinggi tersebut dikaitkan dengan kebutuhan STT untuk pemercepat MBE 300 keV/20 mA, maka direncanakan menggunakan STT jenis transformator dari jenis inti terbumikan (GCT).

Konfigurasi Rangkaian

Dalam STT jenis transformator ini, pada prinsipnya keluaran tegangan tinggi DC diperoleh dari penjumlahan secara seri atas penyearahan tegangan AC dari sejumlah kumparan sekender menggunakan rangkaian pengganda tegangan. Untuk maksud pengaturan tegangan keluaran dapat dilakukan dengan menggunakan variak yang dihubungkan dengan kumparan primer trafo, yang dapat dikontrol secara manual dan atau otomatis. Guna menjaga kesetimbangan beban pada jaringan sumber 3 fase dan untuk menunjang perataan keluaran tegangan tinggi DC atau memperkecil riak tegangan, maka dapat dengan menerapkan konfigurasi transformator 3 fase.

Koil primer dalam konfigurasi 3 fase mendapat catu daya 380 V 50 Hz 3 fase, tiap fase memiliki 2 koil sekunder masing-masing 25.000 V, sehingga bila dihubungkan dengan rangkaian pengganda tegangan akan diperoleh tegangan DC maksimum:

$$V_p = 2V_m$$

dengan V_p adalah tegangan keluaran pengganda tegangan dan V_m tegangan puncak koil.

Struktur penyearah tersusun atas sejumlah rangkaian pengganda tegangan yang masing-masing mendapat masukan dari keluaran koil sekunder, banyaknya rangkaian pengganda tegangan sama dengan banyaknya koil sekunder. Setiap rangkaian pengganda tegangan terdiri atas dua penyearah dan dua kapasitor, tiap penyearah dan kapasitor tersebut harus memiliki kapasitas tegangan kerja > 2 kali tegangan puncak koil sekunder

$$(V_D = V_C) > 2V_m$$

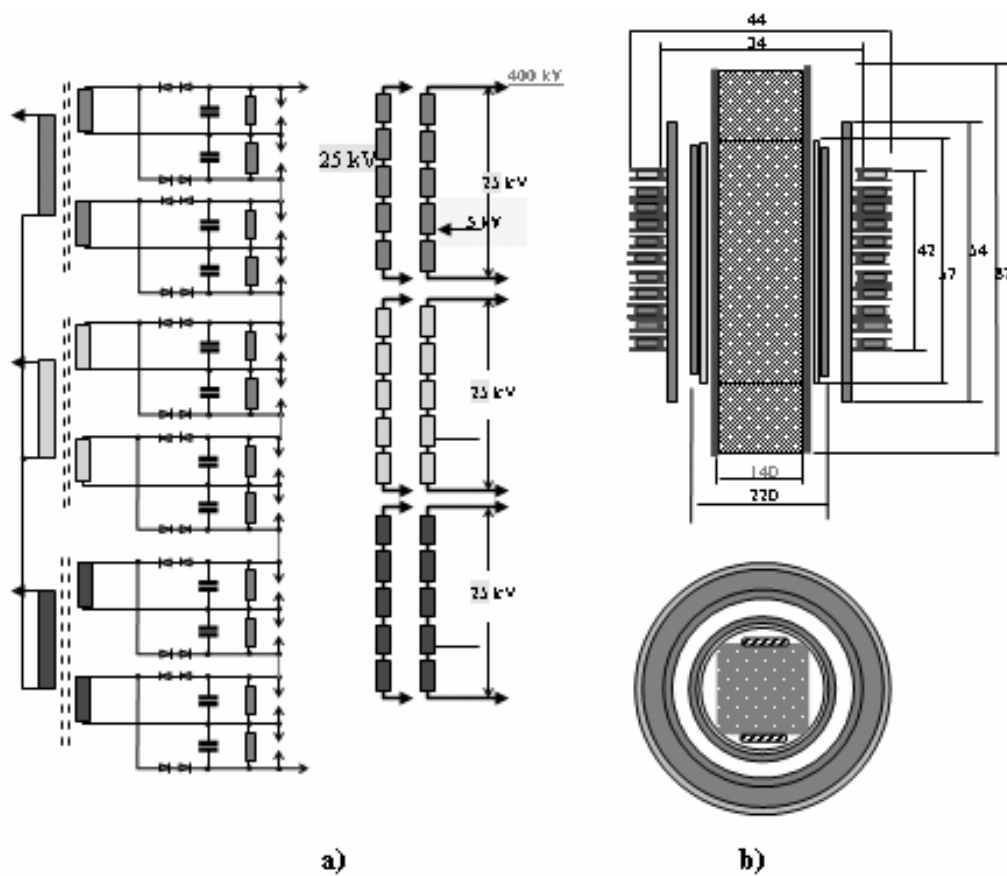
dengan V_D adalah kapasitas tegangan penyearah, V_C kapasitas tegangan kapsitor.

Keluaran tegangan tinggi diperoleh dari jumlah secara seri atas keluaran tegangan DC pengganda tegangan tersebut.

$$V_o = nV_p$$

dengan V_o adalah keluaran tegangan tinggi, n jumlah pengganda tegangan.

Secara skematis konfigurasi rangkaian STT direncanakan seperti dalam Gambar 1a. Rangkaian pengganda tegangan dirakit pada suatu kerangka dan dikemas bersama dengan konstruksi trafo (transformator) di dalam suatu casis. Seluruh komponen tersebut terendam di dalam minyak yang berfungsi sebagai media pendingin dan isolator. Hubungan antara keluaran STT dengan sistem pemercepat melalui suatu konstruksi *feed through* yang isolatornya tahan terhadap tegangan tinggi terkait dan tahan terhadap kebocoran gas tekan di sisi akselerator serta terhadap minyak di sisi trafo.



Gambar 1. a) Diagram rangkaian STT, b) Diagram penampang konstruksi koil.

METODOLOGI

Substansi kegiatan perancangan STT dikelompokkan dalam tiga kategori yaitu kriteria rancangan, dasar perhitungan dan simulasi. Dalam kriteria rancangan dikemukakan batasan-batasan rancangan yang dikehendaki, kemudian rumusan-rumusan untuk menentukan spesifikasi dari berbagai bagian yang dikehendaki termuat dalam dasar perhitungan, akhirnya simulasi untuk menyajikan aplikasi dasar perhitungan guna memperoleh nilai-nilai spesifikasi teknis atas komponen atau sistem yang dimaksud.

Kriteria Rancangan

Kriteria atau norma yang akan digunakan sebagai pedoman perancangan juga berarti batasan-batasan dalam menentukan unsur-unsur spesifikasi teknis meliputi antara lain tentang: jenis STT, kapasitas, konfigurasi, dan dimensi komponen.

a. Penentuan jenis STT

Pemilihan jenis STT dengan memperhatikan beberapa aspek meliputi teknologi, ekonomi dan estetika sebagai berikut:

- Pertimbangan aspek teknologi meliputi: daya besar; sederhana dalam konstruksi, pengoperasian dan perawatannya; handal; banyak menggunakan komponen lokal.
- Harga komparatif dan pengadaan komponennya mudah.
- Konstruksinya kompak dan mobil.

b. Penentuan kapasitas STT

Perancangan kapasitas STT meliputi penentuan: daya, tegangan dan arus keluaran.

- Penentuan kapasitas daya STT mengacu pada besarnya daya MBE, dengan memperhatikan faktor rugi-rugi serta faktor keandalan.
- Tegangan keluaran juga mengacu pada kebutuhan energi MBE.
- Kapasitas arus STT harus cukup besar untuk mengatasi arus berkas MBE beserta rugi-rugi arus yang meliputinya serta dengan melibatkan faktor keandalan.

c. Penentuan konfigurasi

Penentuan konfigurasi meliputi konfigurasi trafo, rangkaian pengganda tegangan dan tata letak komponen.

- Konfigurasi trafo mempertimbangkan perlunya kesetimbangan beban pada jaringan sumber 3-fase dan diperolehnya tegangan keluaran DC yang lebih rata (riak kecil) serta tingkat tegangan koil terhadap resiko tegangan dadal.
- Konfigurasi pengganda tegangan atau penyearah mempertimbangkan kesederhanaan rangkaian dan keandalan komponen.
- Tata letak atau tatanan komponen memperhatikan keamanan terhadap resiko tegangan dadal, kekompakan, pendinginan dan kepraktisan.

d. Dimensi konstruksi

Dimensi konstruksi meliputi dimensi komponen dan dimensi casis.

- Perancangan dimensi komponen STT meliputi trafo dan pengganda tegangan dengan memperhatikan maksud keamanan, kekompakan dan kepraktisan.
- Dimensi casis diperhitungkan untuk dapat menampung seluruh komponen sistem dengan pertimbangan maksud sama seperti pada penentuan dimensi komponen.

Dasar Perhitungan

a. Konfigurasi

Dengan sistem 3-fase, daya STT akan terbagi pada tiap fase (persamaan-1) dan faktor riaknya akan lebih kecil dibanding pada sumber daya 1-fase, hal ini karena frekuensi riak pada hasil penyearahan sistem 3 fase adalah 3 kali lebih besar dari sistem 1 fase seperti ditunjukkan dalam persamaan 2.

$$P_f = P_t / 3 \quad (1)$$

dengan P_f adalah daya per fase, P_t daya trafo 3 fase.

$$r = \frac{V_{rms}}{V_{DC}} = \frac{1}{\sqrt{3} f R_L C} \quad (2)$$

dengan r adalah faktor riak, V_{rms} : tegangan riak, V_{DC} : tegangan DC keluaran, f : frekuensi riak, R_L : tahanan beban, dan C : kapasitansi dari kapasitor

Tegangan keluaran STT merupakan hasil jumlahan secara seri atas tegangan beberapa koil sekunder beserta pengganda tegangannya.

$$V_o = n.V_{PT} \quad (3)$$

dengan V_o adalah tegangan keluaran STT, n jumlah tingkat pengganda tegangan, V_{PT} tegangan DC keluaran tiap pengganda tegangan.

Tegangan DC hasil penyearahan pengganda tegangan dari koil sekunder adalah:

$$V_{PT} = 2V_p = 2(\sqrt{2V_k}) \quad (4)$$

dengan V_{PT} adalah tegangan DC keluaran PT, V_p dan V_k berturut-turut adalah tegangan puncak dan tegangan rms koil sekunder trafo.

Tiap unit tingkat pengganda tegangan terdiri atas sebuah koil, dua buah diode dan dua buah kapasitor, tiap komponen pengganda tegangan yaitu penyearah dan kapasitor akan menahan tegangan sebesar $2V_p$. Besarnya tegangan V_p dan jumlah tingkat n dapat lebih disesuaikan dengan kebutuhan dan ketersediaan bahan yang ada.

b. Dimensi isolasi

Dimensi isolasi dimaksudkan sebagai jarak pemisah/isolasi yang aman antar bagian-bagian berbeda potensial agar tidak terjadi lucutan atau *discharge*. Mengingat bahwa komponen STT di dalam casing akan dicelup di dalam minyak yang memiliki spesifikasi dielektrikum 150 kV/cm, maka penentuan jarak isolasi mengacu pada kekuatan dielektrikum minyak tersebut, namun untuk meningkatkan nilai keamanan kuat dielektrikum diperhitungkan separonya yaitu 75 kV/cm. Nilai dielektrikum tersebut selanjutnya sebagai dasar penentuan dimensi isolasi dalam penataan konstruksi STT atau perakitan komponen di dalam casing.

c. Dimensi inti trafo

Inti trafo terdiri atas susunan plat-plat besi lunak tipis dengan ketebalan < 1 mm,

dibangun dalam konfigurasi 3 fase sehingga memiliki 3 kaki untuk masing-masing lilitan fasenya. Perhitungan dimensi inti dimaksudkan untuk menentukan penampang efektif inti yaitu bagian inti yang ditempati lilitan trafo. Untuk menyederhanakan perhitungan, penampang inti diasumsikan memiliki bentuk segi empat, secara pendekatan dapat ditentukan sebagai berikut^[4]:

$$A = b h \quad (5)$$

$$b = \left(\frac{1,5 P_i}{9,9} \right)^{1/3} \quad (6)$$

$$h = \frac{b}{0,6561} \quad (7)$$

dengan A : adalah luas penampang (cm^2), b dan h : masing-masing adalah sisi penampang (cm), P_o : daya primer (VA)

d. Daya

Kapasitas daya STT ditentukan dengan mempertimbangkan adanya rugi-rugi daya MBE dan faktor utilitas STT. Faktor utilitas diambil untuk maksud keandalan yaitu dengan cara membatasi agar operasi STT tidak perlu memikul beban penuh. Daya trafo dibedakan antara daya primer atau daya masukan P_p dan daya sekunder atau daya keluaran P_s . Daya keluaran trafo atau daya sekunder ditentukan berdasarkan besarnya kapasitas daya MBE, efisiensi mesin MBE dan faktor utilitas, sedangkan daya primer ditentukan berdasarkan daya sekunder dan efisiensi trafo. Penentuan daya-daya tersebut dirumuskan sebagai berikut:

Daya keluaran STT (P_o):

$$P_o = \frac{P_M}{\eta_M \eta_{us}} \quad (8)$$

Daya keluaran trafo atau daya sekunder:

$$P_s = \frac{P_o}{\eta_M \eta_{ut}} \quad (9)$$

Daya masukan atau daya primer:

$$P_p = \frac{P_o}{\eta_t \phi_t} \quad (10)$$

dengan P_o : daya keluaran STT (kW), P_M : kapasitas daya MBE (kW), η_M : efisiensi MBE, η_{us} : faktor utilitas STT, η_{ut} : faktor utilitas trafo, η_i : efisiensi trafo, \emptyset : faktor daya trafo.

e. Jumlah lilitan lilitan

Untuk menentukan dapat jumlah lilitan pada masing-masing koil, terlebih dahulu ditentukan faktor lilitan/Volt atau $N/E = N/Volt$. Jumlah lilitan untuk tegangan yang dikehendaki diperoleh dengan mengalikan besar tegangan dengan faktor N/E tersebut.

Faktor N/E dapat diturunkan dari persamaan pembangkitan tegangan berikut^[2]:

$$E = 4,44 f N \Phi_{max} \quad (11)$$

$$\Phi_{max} = B_{max} A \quad (12)$$

$$E = 4,44 f N B_{max} A 10^{-8} \text{ Volt} \quad (13)$$

dengan E : adalah tegangan yg dibangkitkan (V_{rms}), f : frekuensi (Hz), N : jumlah lilitan, Φ_{max} : fluks maksimum (weber dalam mks), B_{max} : kerapatan fluks maksimum (gauss/cm²), A : penampang inti (cm²).

Tipikal konstruksi transformator pada umumnya memiliki data-data berikut^[2]:

B_{max} : ± 9000 (gauss/cm²), Rugi-rugi inti : $< 1\%$ P_o , Rugi-rugi total: 1-3 % P_o , dan Efisiensi : 97-98 %.

Sehingga dari persamaan (11) dengan frekuensi f : 50 Hz, B_{max} : 9000 (gauss/cm²), faktor N/E dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{N}{E} = \frac{50}{A} \quad (14)$$

f. Arus

Arus keluaran STT ditentukan dengan mempertimbangkan adanya rugi-rugi arus disamping arus MBE (arus sasaran) dan faktor utilitas. Rugi-rugi arus merupakan pemakaian arus diluar arus sasaran berkas elektron yang besarnya sangat tergantung pada kondisi operasi seperti tingkat kevakuman, pemfokusan, tebal window, energi berkas, dan sebagainya. Sedangkan faktor utilitas diambil

untuk maksud keandalan yaitu dengan cara membatasi agar operasi STT tidak memikul arus beban penuh.

Kapasitas arus atau arus keluaran STT:

$$I_o = \frac{I_M}{\eta_M \eta_{us}} \quad (15)$$

Arus keluaran trafo atau arus sekunder:

$$I_s = \frac{I_o}{\eta_{ut}} \quad (16)$$

Arus masukan atau arus primer:

$$I_p = \frac{I_s}{\eta_i} \quad (17)$$

dengan I_o : adalah arus keluaran STT, I_M : kapasitas arus MBE, η_M : rendemen mesin MBE, η_{us} : faktor utilitas STT, η_{ut} : faktor utilitas trafo, dan η_i : efisiensi trafo.

g. Dimensi kawat

Secara pendekatan ukuran penampang kawat kumparan dapat ditentukan dengan menggunakan rumus berikut^[3]:

$$\emptyset = 0,7 \sqrt{I} \quad (15)$$

dengan \emptyset : adalah diameter kawat (mm), I : arus (Amper) yang melalui kawat tersebut.

h. Pengganda tegangan

Tiap unit pengganda tegangan terdiri atas 2 penyearah dan 2 kapasitor, masing-masing kapasitas komponen yaitu tegangan kerja penyearah (V_D) dan tegangan kerja kapasitor (V_C) harus lebih besar dari tegangan puncak koil sekunder (V_M) yang harus disearahkan ($V_M = 1,44 V_k$), jadi $V_D > V_M$ dan $V_C > V_M$. Tegangan hasil pengganda tegangan (V_{PT}) adalah:

$$V_{PT} = 2 V_M \quad (16)$$

3. Simulasi

Simulasi dimaksudkan untuk mengaplikasikan rumusan-rumusan dari dasar-dasar

perhitungan rancangan menggunakan data-data masukan yang dikehendaki, sehingga dapat diperoleh nilai-nilai spesifikasi teknis atas komponen-komponen sistem STT yang dimaksud. Dalam hal ini simulasi dilakukan dengan mengacu pada data atau kapasitas MBE yang dikehendaki yaitu 300 keV/20 mA, sehingga pada akhirnya akan diperoleh hasil-hasil perhitungan yang menunjukkan spesifikasi atas sistem atau bagian-bagian dari STT tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara keseluruhan hasil simulasi menunjukkan bahwa data yang diperoleh tersebut sekaligus merupakan data spesifikasi teknis atas rancangan STT beserta bagian-bagiannya sebagai yang dikehendaki sesuai kriteria rancangan. Berdasarkan hasil simulasi, berikut dikemukakan hasil perhitungan berdasarkan rumusan-rumusan dari dasar perhitungan untuk dapat diketahui sejauh mana kelayakan hasil rancangan sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam kegiatan fabrikasi selanjutnya.

a. Daya

Menggunakan data kapasitas MBE 300 keV/20 mA atau 6 kW dengan efisiensi MBE sebesar 50 %, trafo 3 fase dengan faktor utilitas diambil 75 %, efisiensi trafo diperkirakan 70 %, dan faktor daya trafo sebesar 0,8, maka daya trafo berdasarkan persamaan 8 dan 9 terhitung sebagai berikut :

$$\text{Daya sekunder: } P_o = \frac{6kW}{0,5 \times 0,75} = 16 kW$$

$$\text{Daya primer : } P_i = \frac{16kW}{0,7} = 22,8 kW \text{ atau}$$

$$P_i = \frac{16kW}{0,7 \times 0,8} = 28,5 kVA$$

$$\text{Daya primer per fase: } P_f = 22,8 kW/3 = 7,6 kW \text{ atau } P_i = \frac{7,6kW}{0,8} = 9,5 kVA$$

Dari hasil perhitungan kapasitas STT sebesar 16 kW atas kapasitas MBE 300 keV/20

mA atau 6 kW, dimana efisiensi MBE diperhitungkan 50 % dan faktor utilitas 75 %, dipandang telah cukup memberi kelonggaran kapasitas STT yang diharapkan akan dapat memberikan keandalan operasi STT cukup tinggi.

Tipikal konstruksi trafo pada umumnya memiliki efisiensi > 90 %^[4], sementara dalam rancangan ini diambil 70 %, hal ini dilakukan guna mengantisipasi besarnya rugi-rugi akibat ketidak sempurnaan kualitas bahan dan konstruksi trafo (inti dan kawat) yang akan dihadapi dalam proses fabrikasi secara swakarya kelak.

Konfigurasi trafo STT dalam sistem 3 fase sangat menguntungkan dalam pemerataan beban pada jala-jala sumber 3 fase, karena beban daya akan terbagi rata pada tiap fasenya.

b. Tegangan

Untuk tegangan STT $V_o = 300$ kV, jika digunakan komponen pelipat tegangan dengan kapasitas masing-masing untuk penyearah 50 kV/1 A dan kapasitor 0,22 μ F/50 kV, maka berdasarkan persamaan 3 dan 4 dapat ditentukan :

- Tegangan nominal keluaran pelipat tegangan: $V_{PT} = 50$ kV.
- Jumlah tingkat pengganda tegangan yang diperlukan: $n = 6$.
- Tegangan tiap koil sekunder: $V_k = 25$ kV, sehingga seluruhnya diperlukan 6 buah koil atau 2 koil untuk tiap fase.
- Untuk menghindari beda potensial tinggi pada konstruksi koil, tiap koil sekunder dengan tegangan $V_k = 25$ kV tersebut dibagi menjadi 5 buah koil yang saling terhubung seri dengan tegangan masing-masing $V_s = 5$ kV.

Disamping koil utama tersebut juga diperlukan sumber tegangan untuk sumber elektron yaitu untuk filamen $V_f = 25$ V dan untuk anoda $V_a = 2000$ V.

Bila STT mengalirkan arus beban, pada keluarannya akan muncul tegangan riak. Pada kondisi operasi beban penuh yaitu 300 kV-20 mA, berarti besarnya tahanan beban adalah: $R_L = 300 \text{ kV}/20 \text{ mA} = 15 \text{ M}\Omega$ dan nilai kapasitor total $C = 0,22^6/12$ (dari 12 buah kapasitor

dalam seri), maka berdasarkan persamaan-2 faktor riaknya adalah:

$$r = \frac{12}{\sqrt{3} \times 50 \times 3 \times 15^6 \times 0,22^{-6}} = 0,01 = 1\%$$

Dengan digunakannya komponen pelipat tegangan dengan kapasitas masing-masing untuk penyearah 50 kV/1 A dan kapasitor 0,22 μ F/50 kV, maka telah dapat ditentukan jumlah tingkat pengganda tegangan yang diperlukan yaitu $n = 6$, masing-masing dengan keluaran tegangan nominal $V_{PT} = 50$ kV dan tegangan koil $V_k = 25$ kV. Dengan tegangan koil 25 kV berarti tegangan puncaknya adalah 35 kV, maka akan dicapai keluaran pengganda tegangan $V_{PT} = 70$ kV dan keluaran STT $V_o = 420$ kV. Tegangan puncak dari koil tersebut masih jauh dibawah kapasitas tegangan kerja penyearah dan kapa-sitor, dengan demikian komponen pengganda tegangan cukup aman.

Dengan membagi koil bertegangan 25 kV menjadi 5 buah koil bertegangan 5 kV, maka beda potensial antar lapisan lilitan koil menjadi cukup rendah (< 1000 V) sehingga mudah untuk mengisolasinya.

Pada kondisi operasi beban penuh 300 kV/20 mA, faktor riak r terhitung sekitar 1 %, sehingga cukup kecil dan tidak menjadi masalah kaitannya dengan kebutuhan MBE ini.

c. Arus

- Arus keluaran STT: $I_o = 20/(0,5 \times 0,8) = 50$ mA
- Arus koil primer trafo : $I_p = 7600/(0,8 \times 220) = 43$ A (0,8 faktor daya trafo).
- Arus koil sekunder trafo: $I_s = 1600/(3 \times 2 \times 25000) = 0,107$ A = 107 mA.
- Arus koil sekunder untuk filamen sumber elektron (dikehendaki): $I_f = 20$ A
- Arus koil sekunder untuk anoda sumber elektron (dikehendaki): $I_a = 0,1$ A

Kapasitas arus keluaran trafo yang dicirikan dengan arus koil sekunder sebesar 107 mA dipandang telah cukup longgar sebagai pendukung konstruksi STT 300 kV/50 mA guna mencatu MBE 300 keV/20 mA.

d. Dimensi Kawat Lilitan

Ukuran penampang kawat lilitan ditentukan dengan menggunakan persamaan-15.

- Kawat koil primer: $\varnothing_1 = 0,7 \cdot \sqrt{43} = 4,6$ mm $\cong 5,0$ mm, dimensi tersebut dapat disetarakan dengan 50 batang kawat $\varnothing_1 = 0,7$ mm.
- Kawat koil sekunder: $\varnothing_2 = 0,7 \cdot \sqrt{0,10} = 0,22$ mm $\cong 0,3$ mm
- Kawat koil filamen: $\varnothing_f = 0,7 \cdot \sqrt{20} = 3,13$ mm $\cong 3,5$ mm
- Kawat koil anoda: $\varnothing_a = 0,7 \cdot \sqrt{0,1} = 0,22$ mm $\cong 0,3$ mm

Untuk maksud realisasi konstruksinya kelak agar lebih menunjang tercapainya keandalan maka dimensi kawat tersebut dibulatkan keatas, dengan demikian akan meningkatkan kapasitas mengalirkan arus dan menurunkan nilai resistansinya.

e. Jumlah Lilitan

Jumlah lilitan (N) untuk tiap koil di sisi primer maupun sekunder dapat ditentukan berdasarkan persamaan-14 sebagai berikut:

- Jumlah lilitan per Volt: $N/E = 50/A = 50/173,5 = 0,3$ lilit/Volt.
- Jumlah lilitan koil primer per fase (220 V) : $N_p = 0,3 \times 220 = 66$ lilit.
- Jumlah lilitan koil sekunder per koil (5 kV) : $N_s = 0,3 \times 5000 = 1500$ lilit.
- Jumlah lilitan koil untuk filamen sumber elektron (20V): $N_f = 0,3 \times 20 = 6$ lilit.
- Jumlah lilitan koil anoda sumber elektron (1500V): $N_a = 0,3 \times 1500 = 450$ lilit.

f. Isolasi

Dengan kuat dielektrikum dalam minyak yang diperhitungkan sebesar 75 kV/cm, maka semua jarak isolasi antara kedua bagian yang berpotensi ditentukan dengan nilai tersebut. Misal antara kumparan primer terhadap sekunder dapat berbeda potensial hingga 425 kV, maka jarak isolasinya minimal sebesar: $425/75$ cm = 5,7 cm.

Pengambilan nilai kuat dielektrikum sebesar 75 kV/cm atau 50 % dari nilai spesifikasi minyak trafo yang bakal digunakan yaitu 150 kV/cm dipandang cukup menunjang untuk maksud keamanan terhadap resiko tegangan dadal (*discharghe*).

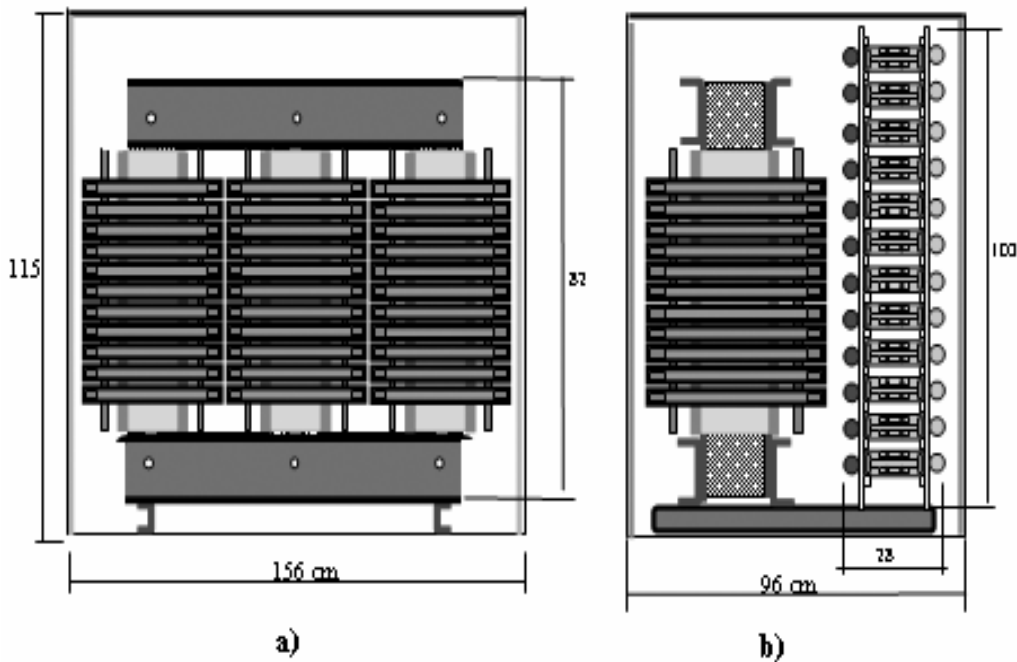
g. Dimensi Inti

Dengan menggunakan asumsi data sebagai tersebut dalam a), dimensi inti dapat ditentukan berdasarakan persamaan 5-7 sebagai berikut:

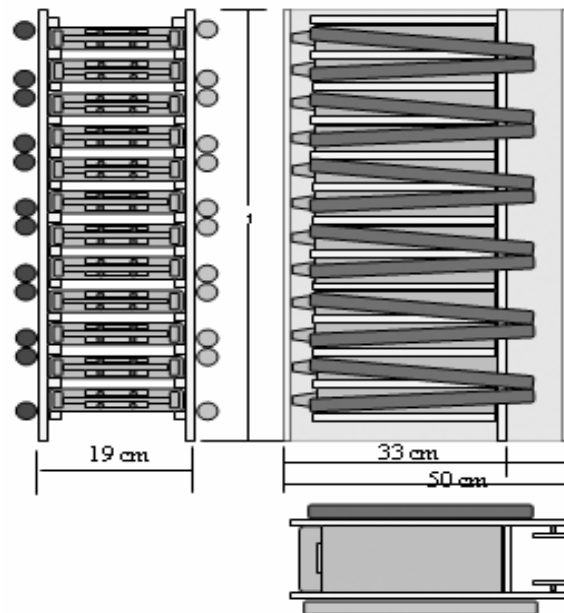
- Sisi panjang: $b = \left(\frac{1,5 P_t}{9,9} \right)^{1/3} = \left(\frac{1,5 \times 8000}{9,9} \right)^{1/3} = 10,67 \text{ cm}$
- Sisi lebar: $h = \frac{b}{0,6561} = \frac{10,67}{0,6561} = 16,26 \text{ cm}$
- Luas penampang efektif: $A = b \times h = 173,5 \text{ cm}^2$.

- Jika penampang inti berbentuk bujur sangkar, maka sisi-sisinya adalah: 13,17 cm. Untuk maksud menghindari kejenuhan inti maka dimensi sisi-sisi tersebut dibulatkan keatas menjadi 14 cm.

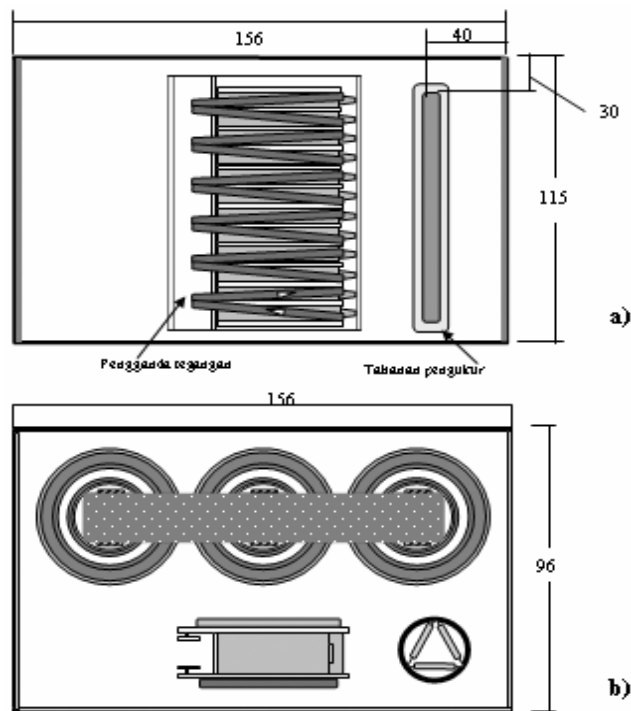
Berdasarkan hasil-hasil perhitungan tersebut berikut disajikan beberapa gambar yang mengilustrasikan diagram rangkaian maupun diagram konstruksi. Pada Gambar 1 disajikan diagram rangkaian sistem STT yang menerangkan konfigurasi sistem dan menerangkan bentuk penampang koil pada intinya, Gambar 2 menerangkan susunan koil 3 fase pada intinya dan penampang struktur letak trafo dan pengganda tegangan di dalam casis (wadah kemasan), Gambar 3 menerangkan struktur komponen pengganda tegangan yang terdiri atas penyearah dan kapasitor, dan Gambar 4 menerangkan tata letak komponen STT di dalam casis.



Gambar 2. a) Diagram penampang trafo 3 fase, b) Diagram penampang trafo dan pengganda tegangan.



Gambar 3. Diagram struktur pengganda tegangan.



Gambar 4. Tata letak komponen di dalam casing, a): pengganda tegangan dan tahanan pengukur, b): trafo, pengganda tegangan dan tahanan pengukur (tampak atas).

KESIMPULAN

Dari perancangan ini dapat dikemukakan bebrapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Perancangan STT dibuat dengan mengacu pada kriteria rancangan yang menerangkan batasan-batasan atas hal-hal pokok sebagai yang dikehendaki.
2. Telah dapat tersusun rumusan-rumusan sebagai dasar perhitungan untuk menentukan spesifikasi teknis atas bagian-bagian yang terkait.
3. Dari hasil simulasi menggunakan data masukan kapasitas MBE 300 keV/20 mA, dihasilkan spesifikasi teknis STT sebagai berikut :
 - Kapasitas daya STT: 350 kV/50 mA.
 - Sumber daya masukan: 3 fase; 28,5 kVA; 380 V; 50 Hz.
 - Tegangan/arus primer trafo per fase: 220 V/43 A.
 - Tegangan/arus sekunder trafo per fase: 2 x 25 kV/100 mA.
 - Jumlah tingkat pengganda tegangan: 6 tingkat.
 - Komponen pengganda tegangan: penyearah: 50 kV/1 A; kapastor: 0,22 μ F/50 kV.
 - Faktor riak tegangan pada kondisi beban penuh: 1 %.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Bp. Heri Sudarmanto, Bp. Sumilan, BE atas segala bentuk bantuannya dalam kegiatan perancangan sumber tegangan tinggi ini sehingga dapat diselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. KASHIWAGI, *Nissin High Voltage Co. Ltd.*, Kyoto, Japan.
- [2] WALDEMAR SCHARF, *Particle Accelerator and Their Uses*, Warsaw, Poland.
- [3] *Majalah ELEKTRON No.14*, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 1984.
- [4] JAMES J. BROPHY, *Basic Electronics For Scientists*, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd, Tokyo, 1977.
- [5] CHESTER L. DAWES, *Electrical Engineering*, McGraw-Hill Book Company, Tokyo.

TANYA JAWAB

Summaryadi

- *Mengapa dipilih trafo 3 fase?*
- *Mengapa tidak menggunakan GCW atau yang lain?*

Djasiman

- Dipilih trafo 3 fase agar diperoleh pembagian beban yang merata pada tiap fase dan faktor riak yang relatif lebih kecil pada keluaran tegangan sumber tegangan tinggi (STT).
- Dipilih STT jenis transformator dari pada jenis yang lain (Gen. CW) karena STT jenis transformator secara umum bersifat sesuai untuk konstruksi daya besar (tegangan rendah dan arus besar) serta konstruksinya lebih sederhana dibanding jenis GCW atau yang lain.