

PERANCANGAN TRAFU TEGANGAN TINGGI UNTUK CATU DAYA PEMERCEPAT ELEKTRON PADA TABUNG SINAR-X RADIOGRAFI

Yadi Yunus⁽¹⁾, Suyamto⁽²⁾

⁽¹⁾Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir (STTN)

⁽²⁾Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PT APB)

Badan Tenaga Nuklir Nasional

Jl. Babarsari P.O.Box 6101 YKBB Yogyakarta 55281,

Email : yadiyunus@gmail.com

ABSTRAK

PERANCANGAN TRAFU TEGANGAN TINGGI UNTUK CATU DAYA PEMERCEPAT ELEKTRON PADA TABUNG SINAR-X RADIOGRAFI. Menuju kemandirian teknologi telah dirancang Trafo untuk Pemercepat Elektron Pada Tabung Sinar-X Radiografi. Tujuan kegiatan ini untuk mendapatkan rancangan sebagai acuan dalam membangun sebuah trafo tegangan tinggi yang dapat digunakan baik pada tabung pesawat Sinar-X Industri maupun Medik. Trafo dirancang dengan daya beban penuh 8.500 VA, 220V/250 kV, model inti berbentuk cruciform dengan pendingin dan isolator Oli Diala B. Setelah dihitung dan dirancang kemudian dievaluasi rugi-rugi tegangan, rugi-rugi daya, efisiensi, arus beban kosong, regulasi tegangan, kuat isolasi hingga kenaikan suhunya. Hasil rancangan adalah trafo dengan penampang inti $\pm 62 \text{ cm}^2$, panjang $\pm 167,54 \text{ cm}$, dan berat 73,6 kg. Kawat primer 8 mm^2 , diameter 3,4mm, berat $\pm 4,2 \text{ kg}$, sekunder $0,007 \text{ mm}^2$, diameter 0,26 mm, berat $\pm 36 \text{ kg}$. Berdasar hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa pada beban penuh prosen regulasi tegangan 3,5 %, efisiensi 95,3 %, arus tanpa beban 5,96 A, beban maksimum kontinyu kenaikan suhu 37°C .

Katakunci: Trafo tegangan tinggi GCT, isolasi tegangan tinggi, pemercepat elektron, tabung Sinar-X

ABSTRACT

DESIGN OF HIGH VOLTAGE TRANSFORMER FOR POWER SUPPLY OF ELECTRON ACCELERATOR ON RADIOGRAPHY X-RAY TUBE. Transformers for Electron Accelerators In Radiography X-Ray Tube has been designed. It aims to get a reference in, builds high voltage transformer which can be used either on the X-ray machines tube for Industry and Medic. Power transformer is designed with a full load 8,500 VA, 220V/250 kV, cruciform-shaped core, with coolant and insulator is Diala B Oil. The result of calculations is the transformer cross-sectional of core $\pm 62 \text{ cm}^2$, the length $\pm 167.54 \text{ cm}$ and weigh of core 73.6 kg. The primary coil with a cross section of wire 8 mm^2 diameter $\pm 3.4 \text{ mm}$, total weight 4.2 kg, secondary of 0.007 mm^2 , diameter 0.26 mm and with weight of 36 kg. Results of analysis showed that voltage regulation percentage at full load is 3.5%, efficiency of 95.3%, exciting current is 5.96 A and the maximum temp rise is 37°C .

Keywords : GCT high voltage transformer, high voltage insulation, electron accelerator, X-ray tube.

1. PENDAHULUAN

Catu daya tegangan tinggi merupakan komponen penting dalam bidang teknologi nuklir, misal untuk pengoperasian detektor, untuk pemercepat partikel (*particle accelerator*) seperti Mesin Berkas Elektron, Implantor Ion pada tabung X-Ray dan lain-lain. Pada sistem pembangkitan tegangan tinggi khususnya untuk daya besar, juga senantiasa terkait dengan transformator tegangan tinggi, teknik isolasi dan sistem pentanahan (*grounding*).

Di Indonesia pada saat ini perangkat penghasil tegangan tinggi untuk bisnis maupun penelitian masih banyak tergantung pada produk luar negeri. Tujuan dari perancangan pada makalah ini antara lain untuk menunjang program kegiatan yang ada kaitannya dengan sistem tegangan tinggi, baik dalam hal perencanaan, pembuatan, pemeliharaan,

serta untuk observasi lebih jauh lagi tentang transformator tegangan tinggi, agar tercapai kemandirian teknologi di bidang tegangan tinggi.

Pada makalah ini dilakukan perhitungan untuk perancangan trafo tegangan tinggi 250 kV, 50 mA yang ada kaitannya dengan sumber tegangan tinggi pemercepat elektron pada tabung Sinar-X radiografi. Perancangan dilandasi pada observasi beberapa trafo tegangan tinggi yang ada pada mesin berkas elektron (MBE) untuk pengolahan lateks buatan PT APB (300 kV, 20 mA), peralatan X-ray untuk industri buatan Philips (60 kV, 90 mA) dan X-ray untuk medis yang ada di STTN buatan China (100 kV, 50 mA) [3]. Proses perancangan transformator ini dilakukan secara manual sehingga dimungkinkan terjadi kekurang tepatan di dalam perhitungan. Hasil penelitian rancangan berupa data disain dari transformator tegangan tinggi untuk pemercepat elektron pada tabung Sinar-X.

2. TEORI

Disain transformator meliputi masalah kemagnetan, kelistrikan, isolasi dan panas. Masalah kemagnetan terkait dengan inti, masalah kelistrikan terkait dengan kumparan. Masalah isolasi terkait dengan bahan dan sistim isolator. Sedangkan masalah panas terkait dengan sistem dan bahan pendingin [1].

Pada umumnya sisi primer transformator tegangan tinggi dicatu dari sumber tegangan PLN 220/380 volt. Metodologi standar disain transformator terkait dengan beberapa hal yaitu masalah persyaratan isolasi, elemen parasitik, rugi inti, pelepasan panas, dan efek korona. Trafo tegangan tinggi umumnya mempunyai perbandingan transformasi 600 : 1 hingga 900 : 1. Untuk itu persyaratan tebal isolasi antara gulungan primer dan sekunder harus mencukupi agar tidak terjadi dadal tegangan [1]. Dengan ketebalan isolasi yang demikian menjadikan kopling elektromagnetik antara primer dan sekunder menjadi tidak se-erat seperti pada trafo tegangan rendah. Akibatnya timbul kapasitansi parasitik yang menginduksikan arus reaktif melalui gulungan sekunder, sehingga efisiensinya turun.

2.1. Sistem Kelistrikan.

Besaran Gaya Gerak Listrik yang dibangkitkan pada suatu lilitan oleh fluks magnet bolak-balik berdasarkan rumus umum Faraday [2]:

$$E = 4,44 \cdot B \cdot N \cdot A_i \cdot f \cdot 10^{-8} \dots\dots\dots(1)$$

dengan E = tegangan yang terbangkitkan (V), B = kerapatan fluk maximum (Gauss)
 N = jumlah kawat lilitan, A_i = luas permukaan inti (cm^2) dan f = frekuensi, (Hz)

Secara ideal, seluruh fluks pada lilitan primer diinduksikan ke lilitan sekunder dan jika V_t adalah tegangan per lilit maka persamaan (1) menjadi,

$$V_t = \frac{E}{N} = 4,44 \cdot f \cdot B \cdot A_i \cdot 10^{-8} \dots\dots\dots(2)$$

Untuk sisi primer maupun sekunder, V_t juga dapat dituliskan sebagai :

$$V_t = \frac{1}{k} \sqrt{EI} \dots\dots\dots(3)$$

dengan $E I$ adalah daya keluaran trafo yang diinginkan dan konstanta (k) untuk trafo distribusi model *core type* antara 40 - 70. Bagi trafo tegangan tinggi, model *Core type* lebih cocok, [1]. Jika daya output trafo 1 fasa dalam watt dinyatakan dengan,

$$P = E_s I_s \cos\phi, \dots\dots\dots(4)$$

dan P_T = rugi daya total = rugi inti (P_{CR}) + rugi tembaga (P_{RCU}), maka efisiensi (η) dapat

dinyatakan dengan [2],

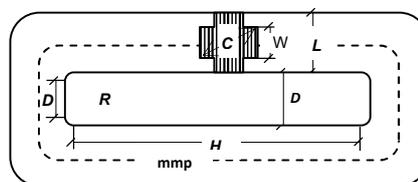
$$\eta = 1 - \frac{P_{CR} + (n^2 \times P_{RCU})}{(n \times P_O) + P_{CR} + (n^2 \times P_{RCU})} \dots\dots\dots(5)$$

dengan P_O = daya output, n adalah persentase pembebanan terhadap daya output maximum.

2.2. Sistem Kemagnetan

Disain sistem kemagnetan dimaksudkan untuk menentukan dimensi inti trafo yang meliputi model, bukaan jendela, luas penampang, bentuk dan faktor tumpukan inti. Trafo tegangan tinggi selain model *core type* penampang intinya sering dibuat bentuk *cruciform* agar lilitannya membentuk lingkaran sehingga mengurangi bentuk tonjolan dan bocor fluks dapat ditekan [2].

Sebagai gambaran jenis trafo *core type* berbentuk seperti Gambar 1.



Gambar 1. Bentuk jenis *core type*.

Dalam menentukan luas jendela trafo perlu memperhitungkan faktor celah kumparan S_f (*winding space factor*), dan juga ditentukan rapat arus (Δ) dalam (Amp/mm^2).

$$S_f = \frac{10}{30 + kV} \dots\dots\dots(6)$$

Panjang dan lebar jendela adalah H dan D , dapat ditentukan dengan,

$$H \times D = \frac{2(N_s \times S_f)}{0,035 \times \Delta} \dots\dots\dots(7)$$

dengan N_s adalah jumlah lilitan sekunder dan Δ adalah rapat arus (A/mm^2). Besaran H biasanya diambil antara 2,5 hingga 3,5 kali D .

$$D = \sqrt{\frac{H \times D}{2,5}} \dots\dots\dots(8)$$

Dengan bentuk penampang inti *cruciform*, luas penampang intinya dapat ditentukan dengan rumus-rumus berikut.

$$A_i = \frac{\Phi_{mak}}{B_{mak} \times S_t} \dots\dots\dots(9)$$

dengan A_i = luasan penampang inti (cm^2), Φ_{mak} = jumlah garis fluks magnet (Weber) B_{mak} adalah rapat fluks (Gauss) dan S_t adalah faktor tumpukan inti (0,9 - 0,95) [1]. Inti bentuk *cruciform* sesuai Gambar 1, dimana pada penampangnya terdapat dimensi W dan L

$$A_i = 2 WL - W^2 \dots\dots\dots(10)$$

W dan L dapat ditentukan dengan $W = 0,525 \times C$ dan $L = 0,85 \times C$, maka dengan persamaan (16) dapat dihitung W dan L dari inti.

$$C = \sqrt{\frac{A_i}{0,616875}} \dots\dots\dots(11)$$

Panjang lintasan magnet rerata mmp (*mean magnetic path*) / panjang inti (L_ϕ), dapat dihitung dengan,

$$L_\phi = 2[H+(D-2R)]+\pi(L+2R) \dots\dots\dots(12)$$

Dari sini dapat ditentukan berat inti total,

$$G_t = \beta_i (S_t \times A_i \times L_\phi) \dots\dots\dots(13)$$

dengan G_t = berat inti (g), β_i = berat jenis bahan inti (g/cm^3), S_t = stacking factor (fakt. tumpukan inti), A_i = luas penampang inti (cm^2), L_ϕ = panjang lintasan magnet (cm).

Bila tiap rapat flux inti $B = 12400$ weber hilang daya pada inti $P_{CR}/\text{kg} = 1,786$ watt/kg, maka bila ditinjau dari berat inti hilang daya pada inti ketika beban penuh dapat dihitung dengan [2],

$$P_{CR2} = G_t \times P_{CR}/\text{kg} \dots\dots\dots(14)$$

2.3. Kumparan Kawat

Volume kumparan inti *cruciform* dapat ditentukan dengan rumus lingkaran, yaitu dicari panjang lilitan rerata mlt (*mean length turn*) dalam cm dimana tiap lilit adalah keliling lingkaran dalam dan keliling lingkaran luar dibagi dua,

$$mlt = [\pi C + \pi (L + D)] / 2 \dots\dots\dots(15)$$

Luas penampang kumparan kedua kumparan (primer dan sekunder) dapat di hitung, dengan rumus,

$$A_{CU} = [2 (N_s \times I_s)] / \Delta \dots\dots\dots(16)$$

dengan A_{CU} = penampang kumparan total (mm^2), Δ = rapat arus maks.kawat (A/mm^2)
 Selanjutnya berat kotor total kawat tembaga

$$G_{CU} = \beta_{cu} \times mlt \times A_{CU} \dots\dots\dots(17)$$

dengan G_{CU} adalah berat kotor total kawat (g), β_{cu} adalah berat jenis kawat (g/cm^3).
 Daya listrik dapat hilang pada satuan berat kawat tembaga dengan fungsi kuadrat rapat arus yang mengalirinya [2] yang perumusannya,

$$P_{CU}/\text{kg} = \frac{2,57 \times \Delta^2}{10^6} \text{ watt/lb} \dots\dots\dots(18)$$

2.4. Isolasi Tegangan Tinggi

Dalam teknologi tegangan tinggi, isolator merupakan hal yang harus diperhitungkan,

karena dengan gagalnya isolasi akan berdampak fatal. Untuk trafo model GCT (*Ground Core Transformer Type*) awal ujung lilitan sekunder disambungkan dengan inti dan bodi trafo itu sendiri dan selanjutnya di ketanahkan (*ground*)^[2]. Untuk itu ujung lilitan bertegangan tertinggi harus benar-benar terisolasi dengan baik terhadap bodi maupun inti trafo.

Selain itu beda tegangan antar lapis dalam kumparan juga riskan terjadinya loncatan tegangan dadal. Karena itu beda tegangan antar lapis dan tebal isolasi terutama pada sisi tegangan tinggi juga harus diperhitungkan dengan benar. Beda tegangan maksimum antar lapis ($\Delta L y_s$) dengan rumus berikut, $\Delta L y_s = 2 \times (V_s/y_s), \dots \dots \dots (19)$

Selanjutnya kuat dielektrikum bahan yang akan digunakan sebagai isolator dapat dihitung dengan perbandingan beda tegangan yang bakal timbul dengan angka dielektrikum bahan tersebut. Sebagai contoh Oli Diala 40 kV/cm^[2].

3. RANCANGAN

Dalam makalah ini dibahas tentang rancangan transformator untuk suplai tegangan tinggi pada Tabung Sinar-X Radiography. Dengan spesifikasi teknis : trafo satu fasa, tegangan efektif primer $V_P = 220$ VAC ; sekunder $V_S = 250000$ V ; daya output trafo $P_O = 8.500$ VA dan frekuensi $f = 50$ Hz. Perhitungan untuk perancangan semuanya dilakukan masih secara manual dengan mengacu pada referensi yang disebutkan pada daftar pustaka. Efisiensi diharapkan saat beban penuh $\eta_{ff} = 96.5$ % , saat 1/4 beban penuh $\eta_{1/4ff} = 95$, kenaikan suhu tidak melampaui 40 °C.

3.1. Perhitungan Prakiraan Rugi-rugi

Perancangan dimulai, dengan kalkulasi secara kasar rugi-rugi daya pada efisiensi yang diinginkan, dengan menggunakan persamaan (4) dan uraiannya^[1], didapatkan,

- Rugi total pada saat beban penuh, $P_T = 308,3$ watt
- Rugi total pada saat 1/4 beban penuh, $P_{1/4} = 111,85$ watt
- Rugi lilitan total saat beban penuh, $P_{Rcu} = 209,55$ watt
- Rugi inti total, $P_{cr} = 308 - 209,23 = 98,75$ watt.

3.2. Perhitungan Jumlah Lilitan

Dengan tegangan per lilitan V_t dihitung dengan persamaan (2) – (3) dan tegangan tinggi disini dengan frekuensi 50 Hz, dengan konstanta k diambil 60^[1], maka diperoleh, $V_t = 1,54$ volt/lilit, dan jumlah lilitan skunder (N_S) dan lilitan primer (N_P) masing-masing, $N_S = 162697,84$ lilitan, $N_P = 143,17$ lilitan.

3.3. Bentuk, Dimensi dan Berat Inti

Bentuk/model inti trafo tegangan tinggi dipilih model : *core type*, dengan model tersebut kumparan primer dan sekunder ditetapkan dan ditempatkan menjadi satu pada salah satu kaki/kolom panjang jendela trafo. Dimensi inti dihitung mulai dengan menentukan *space factor*, dengan persamaan (6) didapat, $S_f = 0,0357$, dan dengan rapat arus pada kawat $\Delta = 5$ A/mm²^[4], serta dengan persamaan (13) maka ukuran jendela trafo, $H \times D = 66407,28$ mm², kemudian dengan $H = 2,5 \times D$ seperti pada Gambar 1 maka, $D = 16,298 \approx 16,3$ cm dan $H = 40,74$ cm. Selanjutnya dengan lilitan sekunder, $N_S = 162697,84$, dan dengan persamaan (1) diperoleh, fluks medan magnet, $\Phi = 692157,99$ maxwell. Dengan Φ tersebut, pada bahan plat baja lunak pada frekuensi $f = 50$ Hz referensi data grafis yang ada^[1] fluks maksimumnya adalah $B_{mak} = 12400$ maxwell /cm². Faktor tumpukan inti S_t ditetapkan = 0.9 dan dengan persamaan (9) penampang termasuk isolasi diperoleh, $A_{gros} = A_{gros} / S_f = 62,021$ cm².

Selanjutnya dengan persamaan (17) dengan inti *cruciform* diperoleh, $A_i = 2 WL - W^2$
 $62,021 = 2(0,525 C)(0,85C) - (0,525C)^2 = 0,8925 C^2 - 0,275625 C^2 = 0,616875 C^2$

$$C = \sqrt{\frac{62,021}{0,616875}} = 10,03 \text{ cm}, W \text{ (lebar dalam)} = 5,3 \text{ cm dan } L \text{ (lebar luar)} = 8,5 \text{ cm}.$$

Jika ditetapkan $R=1\text{cm}$, maka dengan persamaan (12) mmp menjadi, $L_\phi = 167,54 \text{ cm}$. Bila berat jenis inti trafo diambil $^{[5]} \beta = 7,87 \text{ g/cm}^3$ maka berat total kotor inti trafo belum termasuk laminating isoalasi dengan persamaan (13), $G_t = 73,6 \text{ kg}$.

3.4. Volume dan Berat Kawat Kumparan

Volume kumparan secara keseluruhan dapat ditentukan dengan persamaan (14) – (17). Diantaranya panjang lilitan rerata $mlt = 54,71\text{cm}$. Pada kumparan (primer dan skunder), dengan rapat arus $\Delta=5 \text{ A/mm}^2$ $^{[4]}$ maka penampang total kumparan, $A_{CU} = 3253,96 \text{ mm}^2$. Berat kawat kumparan secara keseluruhan dan dengan berat jenis tembaga $^{[5]} 8,96 \text{ g/cm}^3$, berdasarkan persamaan (17), diperoleh $G_{CU} = 15,95 \text{ kg}$. Daya listrik hilang pada satuan berat kawat tembaga dengan fungsi kuadrat rapat arus yang mengalirinya $^{[2]}$ dihitung dengan persamaan (18), didapat $P_{CU} = 191,84 \text{ watt}$.

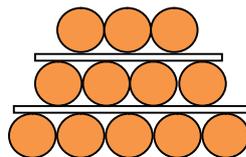
Ketika efisiensi harapan 96,5% maka arus input = arus primer trafo (I_P), jika tegangan input primer 220 V, maka arus primer, $I_P = \frac{P_S}{\eta \times V_P} = \frac{8500}{0,965 \times 220} = 40,4\text{A}$. Jika rapat

arus kawat $\Delta=5\text{A/mm}^2$ maka penampang kawat primer $q_p = 40,4/5 = 8,01 \text{ mm}^2$. Dengan kawat bentuk bulat, diameter kawat tanpa isolasi menjadi $d_p = 3,198 \approx 3,2 \text{ mm}$ plus tebal isolasi menjadi $\approx 3,404 \text{ mm}$, ini tersedia di pasaran $^{[4]}$.

Permukaan total kumparan yang ($32,54 \text{ cm}^2$) sisi panjangnya disesuaikan dengan tinggi jendela trafo ($H \approx 40,74 \text{ cm}$). Jika di kanan-kiri disisakan space 1 cm untuk penempatan isolasi, maka H tersebut dikurangi $2 \times 1 \text{ cm} = 38,74 \text{ cm}$. Selanjutnya dengan $N_P = 143$ lilitan dan diameter kawat primer $d_p = 0,3404 \text{ cm}$, maka jumlah lapis $\pm y_p = (143 \times 0,34)/38 = 1,258 \approx 2$ lapis. Setiap antar lapis diberi kertas aramid /prespan isolasi tebal 0,5 mm hingga tebal kumparan primer dan isolasinya sementara menjadi $th_p = \text{lapis} \times d_p + \text{isolasi(dalam+tengah+luar)} = (2 \times 0,34 + 3 \times 0,05) \text{ cm} = 0,83 \text{ cm}$.

Bagian skunder merupakan pembangkit tegangan tinggi. Pada sisi kanan-kiri kumparan harus diberi space untuk penempatan isolasi yang cukup, maka panjang luasan permukaan sekunder untuk sementara disamakan dengan kumparan primer yaitu 38,74 cm. Arus sekunder $I_S = 0,034 \text{ A}$. Jika rapat arus $\Delta = 5 \text{ A/mm}^2$ maka, penampang kawat skunder : $q_s = 0,034/5 = 0,0068 \text{ mm}^2$ dan diameternya, $d_s = 0,093 \text{ mm}$. Produk yang ada di pasaran $^{[4]}$ kawat terkecil 0,1 mm. Untuk keamanan akan digunakan kawat diameter 0,15 mm + isolasinya menjadi $\approx 0,21 \text{ mm}$. Jadi penampang kawat sekunder plus isolasinya $q_s = 0,035 \text{ mm}^2$. Dengan panjang jendela trafo 38,74 cm, maka jumlah lapis (diasumsikan per lapis jumlah lilit sama) :

$y_s = (162698 \times 0,0210)/38,74 = 88,18 \approx 90$ lapis. Sehingga tebal kumparan sekunder sebelum diisolasi lapis : $th_s = 90 \times 0,21 = 18,9 \approx 20 \text{ mm}$, jumlah lilitan tiap lapis menjadi $N_S / y_s = 162698/90 \approx 1810$ lilitan. Dengan jumlah lilit per lapis dibuat sama dapat menimbulkan hubung singkat antar lapis terutama di bagian tepi kumparan. Guna menghindari hal tersebut, kumparan dibuat system Forstesque $^{[6]}$. Dengan perhitungan excel lapisan terdalam paling banyak 1810 lilitan dan lapisan terluar 200 lilit dengan jumlah lapis 162, susunan secara prinsip seperti Gambar 2.



Gambar 2. Potongan susunan lilitan pada kumparan

Dengan perbedaan jumlah lilit per lapis beda tegangan yang terjadi antar lapis menjadi tidak sama semakin keluar semakin menurun, sehingga ketebalan kertas isolasi antar

lapis juga dapat ditekan. Dengan $V_t = 1,54$ volt/lilit, jika jumlah lilit tiap lapis 810 (untuk lapis ke 100 dan seterusnya dianggap sama maka beda tegangan antar lapis dapat mencapai $(2 \times 810) \times 1,54$ volt/ = $2,494 \approx 2,5$ kV. Dengan kertas aramid dielektrikum $12,2$ kV/mm^[7] untuk lapisan ke 100 dan seterusnya tebal kertas tersebut = $2,5/12,6 = 0,198 \approx 0,2$ mm. Untuk lapisan 1–99 tebal kertas, $[(2 \times 1810) \times 1,54 \text{ volt/lilit}] / 12600 = 0,44 \approx 0,5$ mm. Sehingga tebal rata-rata kertas isolasi yaitu $(0,2 + 0,5) / 2 = 0,35$ mm.

Berdasar tebal kawat dan isolasi tersebut, tebal kumparan sekunder dan isolasinya :
 $th_s = \text{jumlah lapis} \times d_s + \text{isolasi (dalam + tengah + luar)}$,
 $= 162 \times 0,21 + (1 + \text{jumlah lapis}) \times \text{tebal rerata prespan}$
 $= 162 \times 0,21 + (1 + 162) \times 0,35 = 91$ mm

3.5. Isolasi Trafo

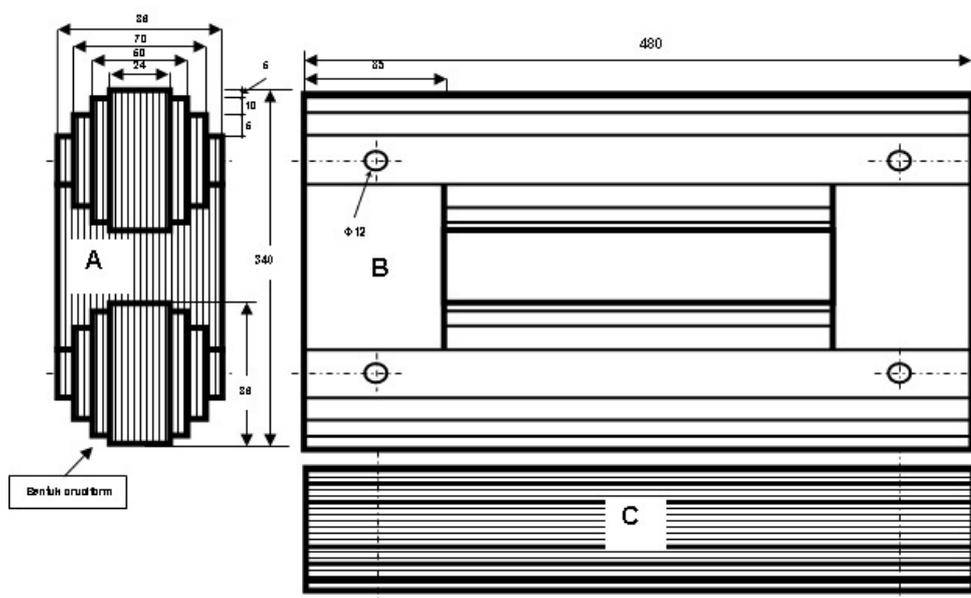
Trafo dirancang tegangan efektif output 250 kV. Tegangan puncaknya $\approx 353,55$ kV. Dengan trafo GCT maka jarak antara ujung akhir lilitan sekunder dengan inti dan bodi trafo (*Jib*) harus memenuhi standar aman. Bila digunakan isolator minyak diala B (40 kV/cm) maka jarak tersebut, $Jib = (353553,4 / 40000)$ cm = $8,84$ cm. Untuk penempatan terminal tegangan tinggi, dibuatkan *bushing* dari bahan plastic Nylon ($23,6$ kV/mm)^[7] dengan ketebalan $t_B = 353553,4 / 23,6 = 14,98$ mm. Sebelum masuk ke bushing ujung kawat sekunder dibungkus selongsong PVC fleksibel ($11,8$ kV/mm)^[7]. Berdasar hal tersebut, tebal PVC yang dibutuhkan $> t_{pvc} = 353,5534 / 11,8 \approx 30$ mm. Kemudian beda tegangan tertinggi antara 2 lapis kumparan yang berdekatan pada kumparan sekunder dengan persamaan (25), $\Delta L_{Y_S} \text{ max.} = 4,365$ kV. Untuk menanggulangi tegangan tersebut perlu isolasi antar lapis kertas Aramid^[9] dengan tebal kertas, $t_k > 4,365 / 12,2 = > 0,358$ mm.

4. PEMBAHASAN

Parameter bahan-bahan yang digunakan untuk pembuatan harus mengikuti bahan yang ada di pasaran, serta perlunya pemberian angka keamanan.

4.1. Dimensi Trafo

Jumlah lilitan primer dari 143,174 dibulatkan menjadi 144 lilit. Jumlah lilitan sekunder dibulatkan menjadi 162700 lilit. Dengan pembulatan tersebut perlu dilakukan



Gambar 3. Bentuk dan dimensi kern/inti trafo A. tampak samping, B. depan dan C. bawah.

evaluasi dan perhitungan ulang pada rugi-rugi tegangan, rugi-rugi daya, efisiensi, arus beban kosong, regulasi tegangan, tegangan dadal isolasi dan kenaikan suhu. Dari beberapa perhitungan ulang dan pembulatan akhirnya diperoleh berbagai ukuran/dimensi yang sesuai bagi trafo yang direncanakan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.

4.2. Hilang Tegangan Pada Sepanjang Kawat Kumaran

Dengan persamaan (15), Gambar 1 dimensi C dibulatkan menjadi = 101 mm sehingga panjang lilitan rerata, $m.l.t_p = 381,11 \text{ mm} \approx 40 \text{ cm}$, sehingga panjang total kawat lilitan primer, $L_p = 40 \text{ cm} \times 144 = 5760 \text{ cm} \approx 58 \text{ m}$ dan berat kawat primer, dengan persamaan (23), menjadi $G_{CUP} = 4,16 \text{ kg}$. Untuk kumparan sekunder susunannya secara prinsip seperti Gambar 2 jumlah lapis 162 dan tebal kumparan th_s 91 mm. Sehingga panjang lilitan reratanya menjadi $m.l.t_s = 705,66 \text{ mm}$. Jadi panjang total kawat lilitan Sekunder, $L_s = 705,66 \text{ mm} \times 162700 = 114,8 \text{ km}$ dan berat kawat sekunder, = 36,0 kg. Sehingga berat total kawat trafo $G_{CUt} = 40,16 \text{ kg}$.

Pada suhu 20°C , tahanan kawat kumparan primer diameter, $2,198 \Omega/\text{km}$ dan untuk ukuran 0,21 pada suhu yang sama tahanannya $1,111 \text{ k}\Omega/\text{km}$ [4]. Jadi, dengan panjang kawat primer $L_p = 58 \text{ m}$ dan sekunder $L_s = 114 \text{ km}$, maka tahanan primer dan sekunder adalah, $R_p = 0,1275 \Omega$, dan $R_s = 127,6 \text{ k}\Omega$. Sehingga drop tegangan dalam kumparan pada saat berbeban untuk sisi sekunder, $V_{R_s} = 4464,46 \text{ volt}$, untuk sisi primer $V_{R_p} = 4,926 \text{ volt}$.

4.3. Rugi-rugi Inti dan Rugi-rugi Tembaga

Rugi inti berdasar berat dengan persamaan (20) didapat, $P_{CR2} = 131,452 \text{ watt}$. Nilai tersebut lebih besar dari nilai rugi inti yang dihitung atas dasar dugaan awal efisiensi yaitu 98,77 watt. Sedangkan rugi daya kawat per satuan berat dengan persamaan (24), $P_{CU} = 275,33 \text{ watt}$. Ini ternyata juga lebih besar dari perhitungan atas dasar dugaan awal efisiensi yaitu 209,23 watt. Rugi daya kawat tembaga juga dapat dicek atas dasar tahanan masing-masing kumparan dengan Hukum Ohm, untuk sisi sekunder, didapat $P_{R_{cu,s}} = 156,26 \text{ watt}$ dan untuk sisi primer didapat $P_{R_{cu1}} = 190,36 \text{ watt}$. Jadi rugi kawat total, $P_{RCUT} = 156,26 \text{ watt} + 190,36 \text{ watt} = 346,62 \text{ watt}$. Lagi-lagi nilai ini juga lebih besar dari yang dihitung berdasar dugaan awal efisiensi.

Kesimpulan sementara perkiraan awal efisiensi masih terlalu besar. Hal ini juga menunjukkan bahwa kawat kumparan perlu dibuat dengan penampang yang lebih besar terutama untuk kawat sekunder, bila *space* masih memungkinkan.

Dengan lebar jendela trafo $D = 16,298 \text{ cm}$, untuk penggunaan kawat sekunder (0,21mm), tebal kumparan sekunder 10,73 cm, berarti masih ada *space* untuk itu. Jika diganti 0,266 mm resistansi $607,6 \Omega / \text{km}$ [4], tebal kumparan sekunder menjadi = $(0,266/0,21) \times 91 \text{ mm} = 115,27 \text{ mm}$ dan keseluruhan tebal kumparan menjadi = $(107,31 + 115,27 - 91) = 131,58 \text{ mm}$. Dengan membesarnya diameter kawat akan menurunkan resistansi tetapi juga diikuti dengan pertambahan panjang kawat akibat pertambahan tebal kumparan. Dengan persamaan (21) panjang reratanya menjadi $m.l.t_s = 833,49 \text{ mm}$ dan panjang kawat kumparan sekunder menjadi, $L_s = 135,86 \text{ km}$ dan Resistansinya menjadi, $R_s = 135,86 \times 607,6 = 82548,54 \Omega$, dan rugi daya kumparan sekunder menjadi, $P_{R_{cuS}} = 0,035^2 \times 82548,54 = 101,12 \text{ watt}$. Rugi daya tembaga total menjadi, $= 190,36 + 101,12 = 291,48 \text{ watt}$ dan rugi daya total trafo adalah Rugi inti + Rugi tembaga berdasarkan tahanan kawat, $W_T = 131,45 + 291,48 \text{ watt} = 422,93 \text{ watt}$.

4.4. Efisiensi Saat Faktor Daya Satu

Efisiensi pada berbagai tingkat pembebanan, dengan persamaan (5) dengan rugi inti nilainya diambil tetap sedangkan rugi tembaga berubah sesuai dengan bebannya. Yaitu $n^2 P_{cu}$ dengan n adalah fraksi pembebanan maka efisiensi ketika pembebanan 100 %, 125 %, 75 %, 50 % dan 25 % masing-masing, adalah $\eta_{1,25} = 0,948$, $\eta_{1,00} = 0,953$, $\eta_{0,75} = 0,956$, $\eta_{0,50} = 0,954$ dan $\eta_{0,25} = 0,934$. Dari nilai beban tersebut menunjukkan bahwa trafo

mampu dibebani sesuai dengan beban yang direncanakan 8500 VA.

4.5. Arus Beban Kosong/Arus Magnetisasi

Arus beban kosong adalah arus magnetisasi. Arus ini harus selalu ada walaupun trafo tidak dibebani. Berdasarkan manual USS nomor 3, dinyatakan bahwa gaya magnetisasi (*magnetizing force*) dengan rapat fluks 83.000 Wb/inc.² adalah 14,5 Ampere-lilit per inc, sedangkan gaya magnetisasi yang diperlukan untuk persambungan inti ± 63 Ampere-lilit per sambungan [1]. Sehingga jumlah gaya magnetisasi maximum (ampere-lilit) yang dibutuhkan untuk magnetisasi inti adalah:

$$TI = (\text{panjang total jalur magnet} \times 14,5) + (\text{jumlah sambungan inti} \times 63)$$

$$= (167,54 \text{ cm} \times 14,5) + (4 \times 63) = 1208,67 \text{ Ampere lilit.}$$

Nilai itu merupakan komponen arus tanpa beban untuk magnetisasi , $I_m = \frac{1208,67}{\sqrt{2} \times 144} = 5,94 \text{ A}$ dan komponen arus yang berubah menjadi energi panas adalah sama dengan arus yang menjadi rugi inti = Rugi inti dibagi tegangan input, $I_w = \frac{131,45}{220} = 0,59 \text{ A}$, sehingga resultan arus eksitasi = arus beban kosong adalah, $I_e = \sqrt{(5,94)^2 + (0,59)^2} = 5,96 \text{ A}$. Persentase arus eksitasi terhadap arus beban penuh adalah : $\% I_o = \frac{5,96}{38,64} \times 100\% = 15,42 \%$.

4.6. Regulasi Tegangan (VR)

Regulasi tegangan adalah besaran perubahan tegangan karena adanya perubahan beban. Nilai regulasi ini dipengaruhi oleh besarnya rugi tegangan resistif dan rugi tegangan reaktif [1]. Besarnya persentase rugi tegangan resistif sisi primer dan sekunder adalah total rugi tembaga dalam persentase terhadap rated KVA ,

$$V_{DR} = \frac{291,48}{8.500} \times 100 = 3,43 \%$$

Sedangkan persentase rugi tegangan reaktif, dihitung berdasar [1], frekuensi jaringan PLN $f = 50$, jumlah lilitan skunder $T_s = 163000$, arus skunder beban penuh = kapasitas trafo dibagi tegangan skunder menjadi $I_s = 0,035 \text{ A}$, m (jumlah bagian sisi tegangan tinggi dan rendah = 2), mlt sisi primer dan skunder = $(400 \text{ mm} + 705,66 \text{ mm})/2 = 552,83 \text{ mm}$, panjang jendela $H = 40,74 \text{ cm} + 1 = 417,4 \text{ mm}$, tebal kumparan primer total $Th_P = 8,31 \text{ mm}$, tebal Isolasi primer sekunder $g = 2 \text{ mm}$ dan tebal kumparan sekunder total $Th_s = 131,58 \text{ mm}$. Berdasarkan hal itu semua persentase *drop* tegangan karena reaktif :

$$V_X = \frac{2 \times 50 \times 163000^2 \times 0,035 \times 55,28}{2 \times 41,74 \times 250000 \times 10^5} \times \left(0,2 + \frac{0,83 + 13,16}{3}\right) (\text{satuan panjang dalam satuan inchi}) = 4,52 \%$$

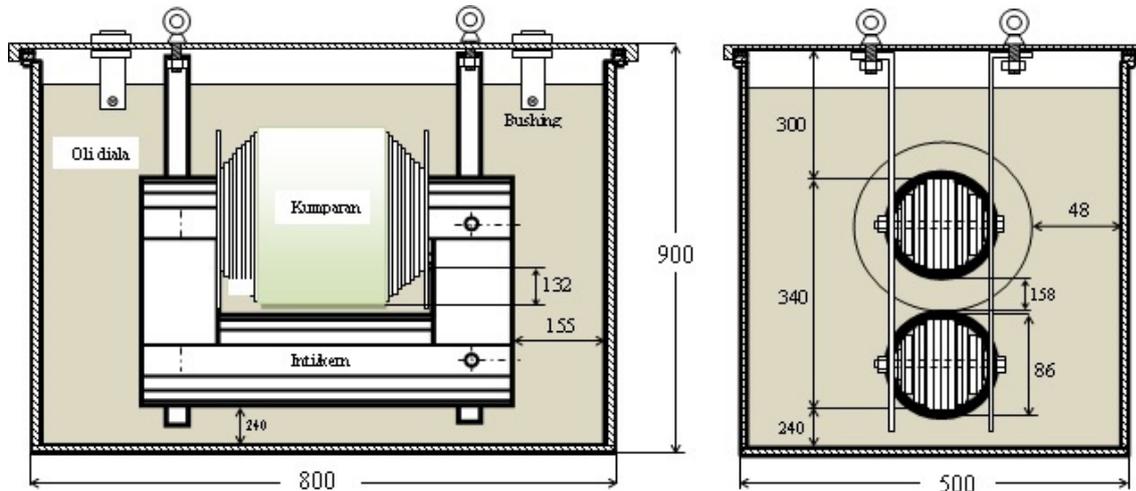
Jadi persentase Regulasi tegangan total, $V_{Reg_1} = 3,43 + (4,52^2/200) = 3,53 \%$

4.7. Pendinginan Trafo.

Trafo didisain dengan model pendinginan oli/minyak. Kenaikan suhu yang diijinkan didisain maximum 40 °C. Dengan suhu tersebut koefisien pendinginan untuk permukaan tangki trafo yang rata/halus [8]: $c = 4,5 \text{ Watt/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$. Jika luas permukaan total tangki untuk pendinginan = rugi daya total ketika beban penuh dibagi dengan perkalian antara suhu maksimum dengan koefisien pendinginan [1], maka luas permukaan tangki untuk pendinginan, $A_D = \frac{422,93}{4,5 \times 40} = 2,35 \text{ m}^2$.

Permukaan untuk pendinginan yang diperhitungkan di sini adalah luas bagian vertikal ditambah setengah luas tutup atas. Jika digunakan kotak tangki berukuran : Panjang 80 cm, Lebar 50 cm, Tinggi 90 cm sebagaimana ditunjukkan Gambar 4. Dengan ukuran seperti itu sudahkah cukup memadai ? *Checking* $A_D = 2(80 + 50) \times 90 + \frac{1}{2} (80 \times 50) = 25400 \text{ cm}^2 = 2,54 \text{ m}^2$. Ternyata ukuran itu sudah cukup memadai dibanding 2,35 m² yang diminta. Dengan luas permukaan tersebut keboleh jadian kenaikan suhu maksimum minyak pendingin adalah , $t = 37 \text{ } ^\circ\text{C}$ dalam kondisi trafo dibebani maximum (8500 VA)

terus menerus. Sedangkan trafo dalam perancangan ini adalah untuk pemakaian-pemakaian sesaat, yaitu ketika saat *exposure* (penembakan) di tabung X-Ray yang ordenya detik.



Gambar 4. Tangki beserta trafo di dalamnya Nampak depan dan samping

Oli/minyak dalam trafo ini disamping sebagai pendingin juga sebagai isolator. Bila digunakan isolasi oli diala B maka ruang untuk memisahkan dinding tangki dengan bagian yang bertegangan tertinggi ($353553,4 \text{ V} \approx 353,55 \text{ kV}$) harus ada jarak minimal : $dL = 353,55/4 \text{ mm} = 88,4 \text{ mm}$. Khusus untuk jarak ujung akhir kawat kumparan sekunder terhadap kern, perlu diisolasi dengan aramid mica^[7] dengan dielektrikum ($39,4 \text{ kV/mm}$), maka tebalnya, $T_{aP} = 353,55/39,4 = 9 \text{ mm}$. Jarak itu juga berlaku untuk jarak ujung kumparan bertegangan tertinggi dengan inti trafo bila trafonya jenis GCT.

5. KESIMPULAN

Berdasar analisis perancangan diperoleh kesimpulan bahwa :

- Trafo tegangan tinggi yang direncanakan untuk catu daya Pemercepat Elektron Pada Tabung Sinar-X Radiografi 8500 VA, 250 kV perlu bahan inti 73,6 kg dan bahan kawat kumparan tembaga 40,16 kg.
- Trafo ini mempunyai efisiensi cukup tinggi (0,966), persen regulasi rendah (3,53 %), dan dengan dimensi tangki (80×50) cm², tinggi 90 cm, pada beban kontinu kenaikan suhu ($37 \text{ }^\circ\text{C}$), dengan beban incidental seperti pesawat sinar-X aman sehingga layak untuk dilaksanakan pembuatannya.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. STILL, A. And SISKIND, CS., *Elements Of Electrical Machine Design*, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC, New York Toronto London (1954).
- [2]. DARSONO, SAEFURROCHMAN, dkk. *Analisis desain dan Uji Kinerja STT MBE Berbasis Trafo*, Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, BATAN 2012.
- [3]. SUYATNO, SIGIT. B, *Analisis Sumber Tegangan Tinggi Pada Pesawat Sinar-X Diagnostik*, Seminar Nasional SDM Teknologi Nuklir VII, Yogyakarta, 16 November 2011 ISSN 1978-0176.
- [4]. HITACHI MAGNET WIRE, *Selection and Use Directions of Magnet Wires*, Japan 1996, www.hitachi-cable.jp/catalog/ME001.pdf.
- [5]. ROGER SANDWICK and TOM MOSFFET, *The Density of Metals and Liquids*, Plattsburgh State University of New York, 2002.
- [6]. ARISMUNANDAR.A, *Teknik Tegangan Tinggi*, Pradnya Paramita, Jakarta 1984.

- [7]. L.I. BERGER, *Hand book of Chemistry and Physics Dielectric Strength Of Insulating Materials*, New York, Oktober 2005.
 [8]. J.P. HOLMAN, (E.JASFI), *Perpindahan Kalor*, Penerbit Erlangga Jakarta , 1984.

LAMPIRAN

Tabel data spesifikasi teknis dari Transformator yang direncanakan

Uraian	Spesifikasi	Keterangan
Kapasitas	220V/250 kV, 8,5 KVA, 1 fasa, 50 Hz	
Model inti Model koneksi	Core type Ground Core	Lihat Gambar 3
Tegangan per lilit	1,54 volt/lilit	
Jumlah lilitan primer	144 lilitan	
Kumparan primer dari kawat email	Kawat tembaga diameter inti 0,20 mm (+ email isolasi menjadi 0,266 mm), total berat ± 4,16 kg	
Jumlah lilitan sekunder /fase/koil	162 700 lilitan	
Kawat sekunder	Kawat tembaga diameter inti = 3,2 mm plus tebal isolasi menjadi = 3,404 mm Total berat ± 36 kg	
Perbandingan transformasi N_2/N_1	1 136,4	
Bentuk penampang inti	Cruciform C (diagonal) = 101 mm; W (lebar dalam) = 53 mm dan L (lebar luar) = 85 mm	Lihat Gambar 3 - 5 pada lampiran
Bahan inti	Plat <i>Silicon steel</i> tebal 0,5 mm, berat ±73,6 kg	
Bahan Koker	Pralon PVC 5 mm (11,8 kV/mm)	
Bahan isolasi / kuat dielektrikum	Plastik nylon (23,6kV/mm), kertas aramid (12,2 kV/mm), Oli shell Diala 4 kV/mm	
Dielektrikum antara: - Kumparan primer - sekunder - Lapis kumparan	24,4 kV 4,8 kV	
Media pendingin sekaligus isolator	Oli shell Diala B	
Ukuran jendela inti trafo	$H = 407,4$ mm $D = 163$ mm,	
Tahanan lilitan sekunder	127,556 k Ω	
Tahanan lilitan primer	0,01275 Ω	
Rugi daya lilitan sekunder	101,12W	
Rugi daya lilitan primer	190,36 W	
Rugi Inti	131,45 W	
Rugi daya total	422,93 W	
Efisiensi pada beban penuh	95,3 %	
Arus beban kosong	5,96 A	
Regulasi tegangan	3,53 %	
Suhu beban penuh	37 °C	