

Perancangan *Unit Auxiliary Transformer* dengan Kapasitas 700 kVA

Raylita Napa Pebrianty¹, Ali Mashar², I Made Wiwit Kastawan³

¹Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : raylitanapa@gmail.com

²Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : amashar69@gmail.com

³Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : wiwit.kastawan@polban.ac.id

ABSTRAK

Dalam membangkitkan listrik, unit pembangkit memiliki beban-beban yang perlu disuplay untuk pemakaian sendiri. Akan tetapi keluaran dari generator terlalu tinggi tegangannya sehingga diperlukan alat penurun tegangan dari keluaran generator tegangan diturunkan ke tegangan rendah untuk pemakaian sendiri yang biasa disebut *Unit Auxiliary Transformer*. Diharapkan pemakaian sendiri dari keluaran generator ini seoptimal mungkin sehingga perlu dilakukan perancangan transformator yang memiliki efisiensi yang baik. Transformator yang dirancang menggunakan model inti besi tipe *core type three limbs*, dengan daya transformator sebesar 700 kVA, tegangan 10,5 kV / 0,4 kV, 50 Hz. Material inti dipilih CRGO *silicon steel* dengan grade 27-M4 sedangkan material belitan dipilih konduktor elektrolitis. Dalam rancangan ini dihitung dimensi transformator baik kumparan maupun intinya. Jumlah lilitan untuk kumparan primer sebanyak 1050 lilitan perfase termasuk dengan penambahan lilitan akibat *tapping* sebanyak 5% dan pada sisi sekunder sebanyak 22 lilitan perfase. Sedangkan perancangan inti dibuat dalam 12 langkah berdiameter total 203 mm dengan berat total 786,33 kg. hasil perancangan tersebut diperoleh rugi-rugi inti sebesar 961,88 Watt. Rugi-rugi belitan sebesar 7313 Watt pada beban penuh. Kemudian efisiensi maksimum didapatkan sebesar 99,225%.

Kata Kunci

Unit Auxiliary Transformer, CRGO silicon steel, konduktor elektrolitis, rugi-rugi, efisiensi.

pemakaian pribadi dengan kapasitas yang kecil.

1. PENDAHULUAN

Dalam sistem pembangkit listrik, transformator merupakan komponen yang sangat penting dan terdapat di semua pembangkit berkapasitas besar terlepas dari apapun jenis sumber energinya. Selain untuk didistribusikan kepada konsumen, daya keluaran generator sebagian digunakan untuk pemakaian pribadi seperti motor listrik, pompa, kompresor, dan lain-lain [6].

Terdapat dua jenis transformator untuk penggunaan daya sendiri yaitu *Station Service Transformer* (SST) dan *Unit Auxiliary Transformer* (UAT). Daya SST didapat dari jaringan sedangkan UAT dari keluaran generator. UAT biasanya digunakan untuk

Transformator tersebut dibutuhkan agar komponen-komponen bantu yang memerlukan daya listrik dapat menerima daya listrik dengan tegangan yang sesuai sehingga meningkatkan kualitas daya dalam suatu pembangkit.

Sebagai mesin konversi energi, tentunya diharapkan transformator dapat mengirim daya dengan efisien. Efisiensi transformator dapat ditentukan oleh design konstruksinya, sehingga perlu dilakukan studi tentang perancangan transformator untuk mempelajari sekaligus mengkaji design seperti apa yang dapat menghasilkan efisiensi transformator yang optimal.

Adapun tujuan dari penelitian kali ini adalah untuk Melakukan perancangan sebuah transformator penurun tegangan dengan kapasitas 700 kVA yang akan

menghubungkan keluaran generator untuk pemakaian sendiri pada pembangkit yang memiliki tegangan sebesar 10,5/0,4 kV selanjutnya hasil perancangan dianalisis performanya meliputi rugi-rugi dan efisiensi. Gambar 1. menunjukkan tahapan-tahapan penelitian yang akan dilakukan.



Gambar 1. Diagram Alir Tahapan Perancangan

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator Daya

Transformator adalah mesin listrik statis yang mentransfer energi listrik dari suatu sirkuit ke sirkuit lainnya dengan prinsip induksi elektromagnetik tanpa perubahan frekuensi. Istilah transformator daya dimaksudkan untuk transformator dengan daya yang besar, umumnya dengan daya rating lebih besar dari 500 kVA [5].

2.2 Jenis-jenis Belitan Transformator Daya

Pemilihan jenis belitan transformator perlu diperhatikan dalam merancang transformator sesuai dengan kapasitas dan tegangan rating-nya. Pada perancangan kali ini terdapat dua

jenis belitan yang perlu dipahami yaitu *Helical Windings* dan *Crossover Winding*.

2.2.1 Helical Windings

Belitan transformator memiliki jumlah lilitan yang sedikit dan luas penampang kawat yang besar sehingga arus yang mampu dilewatkan juga memiliki nilai yang cukup besar yaitu lebih dari 100 ampere. kawat yang berbentuk persegi. Penggunaan persegi karena luas penampang yang besar sehingga penggunaan ruang untuk lilitan menjadi lebih efisien, Lilitan dibentuk secara parallel dalam satu belitan. Antara lilitan dibentuk dengan arah aksial dalam satu arah spiral atau helix.

2.2.2 Crossover Windings

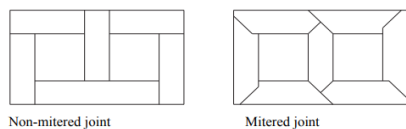
Crossover windings biasanya digunakan untuk sisi tegangan tinggi pada transformator dengan kapasitas yang kecil. Belitan ini biasanya terdiri dari beberapa koil dengan tujuan mengurangi tegangan antara layering yang berdekatan. Kumputan ini dipisahkan secara aksial dengan jarak 0,5 hingga 1 mm. Ujung bagian dalam kumputan terhubung ke ujung sisi terluar dari kumputan yang berdekatan. Panjang aksial dari setiap kumputan adalah sekitar 50 mm sedangkan jarak antara dua kumputan adalah sekitar 6 mm untuk menampung blok bahan isolasi.

2.3 Inti Transformator Daya

Konstruksi transformator terbagi menjadi dua tipe umum yaitu tipe inti (*core type*), bila kedudukan kumputan mengelilingi inti. dan tipe cangkang (*shell type*), bila kumputan dikelilingi inti. Bagian dari inti, yang dikelilingi oleh belitan, disebut tungkai atau kaki (*limbs*). Bagian yang tidak dikelilingi oleh belitan, tetapi penting untuk melengkapi jalur fluks, disebut kuk (*yoke*).

2.3.1 Building Factor

Gambar 2. menunjukkan jenis sambungan (joint) yang umum digunakan, yaitu Nonmited joint dan Mited joint. Nonmited joint memiliki sudut overlap 90° yang lebih sederhana secara manufaktur tetapi memiliki kerugian yang lebih besar di sudut-sudutnya. Mited joint memiliki sudut overlap(α) 30° - 60° . Sudut yang paling umum digunakan sebesar 45° [3].



Gambar 2. jenis joint yang umum digunakan

Building factor biasanya ditentukan untuk peningkatan kualitas material. Faktor bangunan yang sesuai harus digunakan berdasarkan data percobaan/pengujian. *Building factor* untuk transformator tiga fase inti jenis tiga kaki berada dalam kisaran 1,1 hingga 1,25 dengan sambungan mitered [2] [7].

2.4 Rugi-rugi Transformator Daya

2.4.1 Rugi Tanpa Beban

Rugi tanpa beban (P_{fe}) dari suatu peralatan listrik diperkirakan hingga maksimal sekitar 5% dari *rated power*-nya [3]. Sebuah studi membuktikan bahwa CRGO steels dengan grade M4 memiliki nilai rugi inti yang lebih baik sebanyak 30% daripada CRGO steels M5 [1].

Rugi-rugi inti hasil perancangan didapatkan dari berat total inti (w_c) dikali dengan rugi spesifiknya ($P_{fe(s)}$) seperti pada persamaan berikut.

$$P_{fe} = w_c \times P_{fe(s)} \times 1,25 \quad (1)$$

2.4.2 Rugi Berbeban

Rugi-rugi berbeban (P_{cu}) dipengaruhi oleh besar nya arus (I) yang mengalir ke beban. Rugi-rugi berbeban timbul akibat dari komponen resistif (R) pada belitan transformator baik primer maupun sekunder [4]. Untuk menghitung rugi-rugi beban dapat digunakan Persaman II.15.

$$P_{cu} = I^2 R \quad (2)$$

2.5 Efisiensi Transformator Daya

Selanjutnya setelah diperoleh rugi-rugi total transformator ($P_{rugi\ total}$) dapat diketahui Efisiensi transformator sebagai berikut.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{rugi\ total}} \times 100\% \quad (3)$$

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Perancangan

Tahapan perancangan transformator diawali dengan menentukan spesifikasi perancangan kemudian merancang belitan transformator, karena konfigurasi belitan akan berpengaruh

kepada tinggi dan lebar dari inti, terutama belitan tegangan tinggi transformator.

3.1.1 Spesifikasi Perancangan Transformator

Tabel 1. Tabel Spesifikasi Perancangan

Power Rating	700000		VA
Primary voltage	10500		Volt
Secondary Voltage	400		Volt
No. of phase	3		fase
Frekuensi	50		Hz
Koneksi	Delta/star-Dyn-11		
Material Belitan	Tembaga		
Tapping on HV	At ±	2,5 %	5%
Maximum Flux density [B]	1,6		Tesla
Maximum current density [Cd]	2,6		A/sq mm
Impedansi [Guaranteed]	5,2		%
P_{fe} [Guaranteed]	1100		Watt
P_{cu} [Guaranteed]	9900		Watt

3.1.2 Perancangan Belitan

Menentukan jumlah tegangan per lilitan (E_t)

$$E_t = K\sqrt{S} = 10,32 \text{ volts/turn} \quad (4)$$

Nilai koefisien K disini ditentukan 0,39-0,44 untuk belitan dengan jenis tembaga, nilai K ini dapat disesuaikan untuk mendapatkan nilai impedansi dan rugi-rugi yang sesuai dengan *guaranteed value* untuk setiap parameter tersebut [2]. Sehingga pada penelitian ini dilakukan iterasi untuk menentukan nilai K sehingga dipilih nilai K sebesar 0,39.

Tabel 2. Iterasi Nilai K

Nilai K	Impedansi	Rugi inti [Watt]	Rugi Belitan [Watt]
0,37	6,052%	879,454	7549
0,38	5,224%	920,68	7492
0,39	5,041%	961,29	7312
0,4	5,041%	961,288	7312
0,41	4,587%	1032,727	6883
0,42	4,587%	1032,727	6883

Sehingga jumlah belitan transformator

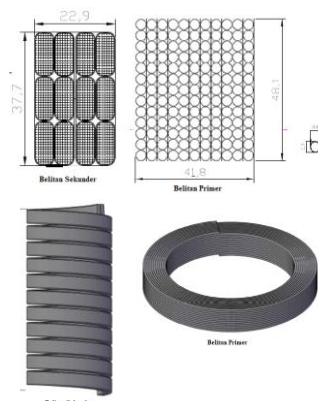
$$\frac{Vs \text{ per Fase}}{E_t} = \frac{Vs/\sqrt{3}}{E_t} = 22 \text{ turns} \quad (5)$$

Dengan menggunakan perbandingan rasio didapatkan belitan primer sebanyak 1000 lilitan, dengan tambahan lilitan tapping 5% jumlah lilitan tegangan primer per fase sebanyak 1050 lilitan.

Belitan sekunder menggunakan jenis belitan *helical windings* dengan dua layer sehingga per layer didapatkan jumlah lilitan 11 lilitan. Konduktor untuk belitan sekunder berbentuk persegi untuk menompang arus yang tinggi karena tegangan yang rendah.

Belitan primer menggunakan jenis belitan crossover windings dengan 8 koil. 2 diantaranya merupakan belitan dengan *tapping*. Bentuk konduktor belitan primer berbentuk lingkaran, karena tegangan yang tinggi sehingga arus yang mengalir di lilitan rendah.

Ilustrasi belitan primer dan sekunder ditunjukkan pada Gambar 3. Untuk belitan primer, ilustrasi hanya menunjukkan belitan per koil.



Gambar 3. Dimensi Belitan Transformator

Tabel 3. Dimensi Belitan Primer

No.	Deskripsi	Axial	Radi al
1	Konduktor tanpa enamel	3,30	3,30
2	Covered thickness towards DPC	+0,35	+0,35
3	celah antara dua konduktor berurutan	+0,05	+0,05
	4 mil insulasi interlayer =		+0,10
	Insulation size of conductor with working tolerance	3,70	3,80
4	Turns per layer		x11
	$\frac{133}{11} + 1 = 13,09$	x13,00	
5.	Axial Length of HV coil	48,1	41,8
	Dibulatkan menjadi	50	42
Catatan: Untuk Panjang aksial dibulatkan ke angka habis dibagi 10 terdekat [4]			

Dengan didapatkannya dimensi belitan primer maka didapatkan tinggi inti dengan total panjang belitan primer ditambah dengan jarak antar belitan, jarak antara belitan dengan *yoke* inti yang diasumsikan didapatkan tinggi inti 525 mm.

Dimensi belitan sekunder ditunjukkan pada Tabel 4 dengan satuan dalam mm.

Tabel 4. Dimensi Belitan Sekunder

No.	Deskripsi	Axial	Radi al
1	Bare Size of Strips	12	5
2	Covered thickness towards TPC	+0,5	+0,5
3	celah antara dua strips berurutan	+0,1	+0,1
	Insulation size of conductor with working tolerance	12,60	5,60
4	Penempatan Strip (Width and Depth)	x3	x2
	Dimensi efektif setiap lilitan (20 mil as inter-layer insulation)	+37,8	+11
			+0,5
5	Space required to accommodate No. of turns	x13	+11
	Rounding of to	490	23
6	use end packing of	10	
	5 mm on either side coil		
7	Panjang total dari LV coils	500	23

3.1.3 Perancangan Inti

Menentukan Diameter Inti dengan menggunakan persamaan berikut untuk mengetahui luas inti.

$$A_g = \frac{E_t}{4,44 \times f \times B_m \times 10^{-4}} \quad (6)$$

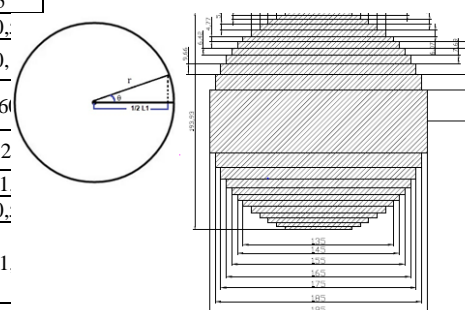
$$= 304,75 \text{ cm}^2$$

Sehingga diameter inti didapatkan sebesar 203 mm

Inti dari transformator ini akan dibuat dari beberapa lapisan besi. Pada perancangan kali ini dipilih jumlah langkah penumpukan sebanyak 12 langkah. Panjang langkah pertama dicari dengan menggunakan pendekatan *pythagoras* pada sudut 15° selanjutnya lebar setiap langkah ke n (K_n) dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$K_n = \sqrt{d^2 - L_n^2} - K_{n-1} \quad (7)$$

Penumpukan inti ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Laminasi Inti

Inti akan dibagi menjadi tiga bagian yaitu bagian A, B, dan C. Menghitung tinggi (H) dan berat (W) dengan Density Core Material

(ρ_{core}) sebesar 7,65 g/cm³ [2][3]. Perbagian menggunakan persamaan berikut yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 5.

Part A :

$$H = (W/H + 2 L) \text{ mm} \quad (8)$$

$$\text{Berat inti} = (H-L) \times L \times K \times 7,65 \times 0,97 \times 10^{-6} \text{ kg} \quad (9)$$

Part B:

$$H = (W/H + L) \text{ mm} \quad (10)$$

$$\text{Berat} = (H-0,5L) \times L \times K \times 7,65 \times 0,97 \times 10^{-6} \text{ kg} \quad (11)$$

Part C

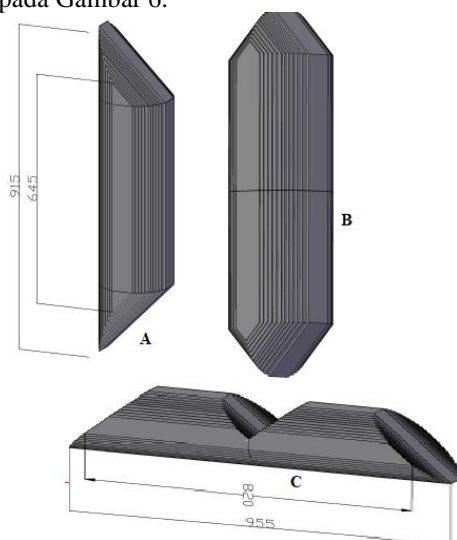
$$H = (2 \times (C/L) + L) \text{ mm} \quad (12)$$

$$\text{Berat} = [(H-L) \times L - (1/2 L)^2] \times K \times 7,65 \times 0,97 \times 10^{-6} \text{ kg} \quad (13)$$

Tabel 5. Detail Inti

No.	L	K	H [mm]			W [kg]		
			A	B	C	2xA	B	2xC
1	195	56,4	915	720	955	117,58	50,83	128,22
2	185	27,1	895	710	945	52,91	23,01	58,98
3	175	19,3	875	700	935	35,11	15,36	40,03
4	165	15,4	855	690	925	25,97	11,43	30,31
5	155	12,8	835	680	915	20,08	8,9	24,02
6	145	10,9	815	670	905	15,83	7,06	19,44
7	135	9,5	795	660	895	12,6	5,66	15,89
8	120	12,1	765	645	880	13,93	6,32	18,32
9	105	10,0	735	630	865	9,83	4,5	13,34
10	90	8,2	705	615	850	6,75	3,13	9,84
11	75	6,7	675	600	835	4,46	2,09	6,92
12	60	5,3	645	585	820	2,76	1,31	4,65
Total Berat Inti						786,33		

Dari perhitungan pada Tabel 5. Maka dihasilkan perbagian inti seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Bagian A,B, dan C Inti Transformator

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Rugi Berbeban

Berdasarkan Persamaan (2) maka rugi berbeban hasil perancangan didapatkan pada Tabel 6. Besarnya rugi berbeban tergantung dari bahan konduktor, juga pemilihan jenis belitan, untuk *crossover windings*, pemilihan jumlah koil akan berpengaruh kepada diameter belitan sehingga berpengaruh pada rugi berbeban

Tabel 6. Kalkulasi Rugi Berbeban

Winding resistance and load loss			
Jumlah lilitan tanpa tapping (T)	22,0	1000	T
Total Panjang Konduktor (L) [L' x T]	16172	1014700	mm
Resistivity of Electrolytic Copper [K]	0,021	0,021	ohm-cm
Cross sectional Area of Conductor (A)	354,84	8,553	sq mm
Winding resistance per phase at 75°C [R] (dalam m.ohm)	0,000957	2,491	ohm
Current per Phase	1010	22,2	A
P _R per Phase	976	1228	Watt
P _R 3 Phase	2928	3684	Watt
P _R Total (LV+HV)	6612		Watt
Approximate Stray Loss for 70 kVA	700		Watt
Load Loss at rated load and at 75°C	7312		Watt

4.2 Rugi Tanpa Beban

Berdasarkan Persamaan (1) maka rugi tanpa beban dapat diketahui dengan mengetahui *working flux density*. Sehingga didapatkan rugi inti pada Tabel 7. Rugi inti dipengaruhi oleh luasan inti, juga konfigurasi belitan, semakin tinggi panjang aksial belitan maka semakin tinggi juga tinggi inti, sehingga berat inti bertambah dan bertambahnya berat inti linear dengan bertambahnya rugi inti.

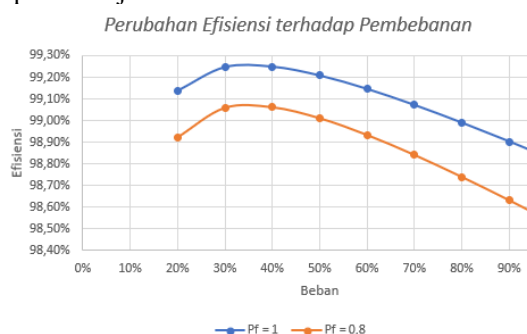
Tabel 7. Kalkulasi Rugi Tanpa Beban

Working Flux Density [1][2]	1,579	Tesla
Grade of Core	27-M4	
Rugi Spesifik	0,978	W/kg
Handling Factor	25%	
Calculated no load loss	961,29	W

4.3 Efisiensi Transformator

Dari persamaan (3) dan rugi-rugi transformator telah diketahui efisiensi transformator terhadap kenaikan beban disajikan pada grafik pada Gambar 7.

Pada Gambar 7. menunjukkan perubahan efisiensi terhadap perubahan pembebanan, efisiensi akan meningkat hingga titik maksimum efisiensi pada saat beban sebesar 36,26% yaitu dimana rugi tanpa beban sama dengan rugi berbeban. Jika transformator dioperasikan lebih dari beban tersebut maka rugi-rugi berbeban akan semakin besar, salah satu bentuk dari rugi-rugi beban atau rugi-rugi belitan akibat komponen resistif ini adalah panas. Ketika panas dari belitan melebihi dari batas temperatur kerjanya maka transformator akan trip. Dalam kasus perancangan kali ini tidak merancang bagian pendinginan sehingga tidak dapat ditentukan batas maksimal suhu operasi kerja transformator.



Gambar 7. Perubahan Efisiensi terhadap Pembebanan

4.4 Validasi

Hasil rancangan kemudian divalidasi atau dibandingkan dengan transformator yang telah terpasang dengan kapasitas dan tegangan *rated* yang sama. Perbandingan dapat dilihat pada Tabel 8. Hasil perbandingan dengan transformator terpasang menunjukkan bahwa transformator hasil perancangan lebih baik dibandingkan transformator yang sudah terpasang. Perbedaan signifikan terdapat pada rugi-rugi belitan sehingga berpengaruh pada rugi-rugi transformator. Tidak diketahui bagaimana konfigurasi dari belitan terpasang. Namun, Rugi-rugi belitan dapat dipengaruhi dari pemilihan jumlah koil belitan, semakin sedikit jumlah koil yang dipilih semakin besar rugi-rugi belitan yang dihasilkan seperti telah dibahas pada sub-bab 4.1.

Tabel 8. Validasi Hasil Rancangan

Deskripsi	Hasil Perancangan	Terpasang
Rated Power	700 kVA	700kVA
V _p	10500 V	10500 V
V _s	400 V	400 V

Connectio n	Dyn11	Dyn11		
Tapping	+/- 2,5%;5%	+/- 2,5%;5%		
Frekuensi	50 Hz	50 Hz		
Impedansi (%)	5,041%	5,21%		
P _{fe}	961,288 W	1043 W		
P _{cu}	7,312 kW	10,32 kW		
Regulasi Tegangan	1,511%	2,654%		
Efisiensi				
Max Efisiensi	99,23%	99,04%		
Load :	PF = 1	PF = 0,8	PF = 1	PF = 0,8
80%	99,00 %	98,76 %	98,65 %	98,32 %
60%	99,15 %	98,94 %	98,88 %	98,60 %
40%	99,24 %	99,06 %	99,05 %	98,81 %
30%	99,23 %	99,05 %	99,07 %	98,84 %

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Transformator daya memiliki rasio tegangan 10,5/0,4 kV dengan tapping voltage $\pm 5\%$ pada sisi tegangan tinggi, dengan bahan belitan konduktor tembaga elektrolit, tipe koil belitan primer adalah *crossover* dengan 8 coil dan belitan sekunder adalah *helical*. Material inti adalah silicon steel 27-M4 dengan tipe inti tiga kaki, inti transformator disusun oleh lapisan dengan 12 langkah peningkatan penumpukan inti.
2. Berdasarkan analisis yang dilakukan didapatkan rugi-rugi tanpa beban transformator sebesar 961,288 W dan rugi-rugi beban penuh sebesar 7312 W. Efisiensi maksimum didapatkan pada beban 36,3% efisiensi sebesar 99,248%,

5.2 Saran

1. Pada perancangan transformator daya kali ini penulis tidak mempertimbangkan aspek ekonomi, untuk penelitian selanjutnya dapat diperhatikan analisis biaya untuk mendapatkan perancangan yang optimal.
2. Pada perancangan kali ini hanya memperhitungkan bagian active part dari transformator, selanjutnya dapat dilakukan perancangan untuk

komponen-komponen tambahan transformator terutama bagian pendinginan transformator agar dapat diketahui batas suhu kerja transformator.

3. Perancangan ini dapat dilanjutkan analisis dengan *finite element methode* untuk mengetahui distribusi rapat fluksi inti transformator dan kaitannya dengan rugi-rugi inti.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dawood, Kamran., Guven Komurgoz, and Dr. Fatih Isik. 2019. Modeling of Distribution Transformer for Analysis of Core Losses of Different Core Materials Using FEM. <https://doi.org/10.1109/ICEPE50861.2021.9404477>
- [2] Dasgupta, Idrajit. 2002. *Design of Transformer*. New Delhi: McGraw-Hill Education.
- [3] Freitag, Christian., and Thomas Leibfried. 2017. Mixed Core Design for Power Transformers to Reduce Core Losses. Germany: Karlsruhe institute of Technology (KIT). <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2017.7974963>.
- [4] Haidar, Ahmed M.A., and Majid Al-Dabbagh. 2015. The Influences of T-joint Core Design on No-load Losses in Transformer. IEEE POTENTIALS. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2012.2211911>.
- [5] Jamali, M., M. Mirzaie, and S. Asghar Gholamian. Calculation and Analysis of Transformer Inrush Current Based on Parameters of Transformer and Operating Conditions, ISSN 1392-1215 ©2011.
- [6] Jiang, Jun., and Guoming Ma. 2021. Optical Sensing in Power Transformers. Hoboken: Wiley.
- [7] Kulkarni, S.V., S.A. Khaparde. Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics Second Edition. Boca Raton: Taylor & Francis Group.