

Analisa Stray Losses Pada Struktur Transformator Daya Satu Fasa 275 kV 83.3 MVA

Asep Saepudin^{1*} Asep Dharmanto²

^{1,2} Program Studi Teknik Mesin

Sekolah Tinggi Teknologi Muhammadiyah Cileungsi

Jl. Anggrek No.25 Perum PTSC Cileungsi, Bogor, Jawa Barat

*E-mail: asepsaepudin@sttmcileungsi.com, asepdharmanto@sttmcileungsi.ac.id

Abstrak. Trafo yang bagus dihargai jika memiliki efisiensi di atas 99%. Umumnya kerugian terjadi pada semua transformator dalam tiga atau satu fasa. Kehilangan nyasar dihasilkan oleh kehilangan arus eddy pada bagian konstruksi transformator fasa tunggal, seperti tangki utama, penutup, klem inti dan pelat flitch. Masalahnya adalah bahwa kerugian Tersesat yang terjadi tidak dapat langsung mengukur tanpa alat yang tepat dan hanya dihitung. Penelitian ini adalah untuk melihat hasil deviasi dalam kerugian menyimpang, antara perhitungan dan pengukuran dan vs simulasi. Sehingga kerugian nyasar yang lebih akurat dihasilkan di bagian konstruksi transformator fasa tunggal dapat dicapai. Dalam penelitian ini menggunakan Metode Elemen Hingga 3D dengan perangkat lunak ANSYS berbasis di bagian konstruksi transformator fasa tunggal dan membandingkan hasil kerugian nyasar dengan versi yang dihitung dan diukur. Kehilangan nyasar di bagian konstruksi transformator fasa tunggal, sehingga tidak memiliki kerugian nyasar yang sederhana dibagi 3 dibandingkan dengan transformator tiga fasa dengan daya dan tegangan yang sama. Berdasarkan penelitian ini total kerugian nyasar sekitar 30% - 37% dari Kerugian Beban dan meningkat sekitar 9% dibandingkan antara perhitungan yang ada dan studi simulasi ini versus pengukuran.

Kata kunci: Kerugian Arus eddy, Flitch Plate, Metode Elemen Hingga 3D.

Abstract. A good transformer is valued if having efficiency above 99%. Generally losses occur to all transformer in either three or one phases. Stray losses are generated by eddy current losses in the single phase transformer construction parts, such as main tank, cover, core clamp and flitch plate. The problem is that a stray losses that occur can't directly measure without proper tools and only calculated. This study is to see the deviation result in stray losses, between calculation vs measurement and vs simulation. So that a more accurate stray losses being generated in the single phase transformer construction parts can be achieved. In this study using 3D Finite Element Method with basis software ANSYS in the single phase transformer construction parts and compared the result of stray losses to the calculated & measuring version. The stray losses in the single phase transformer construction parts, so that it hasn't a simple stray losses divided by 3 compared to three phase transformers with same power and voltage. Based on this study the total stray losses around 30%-37% from Load Losses and improve approximately 9% compared between existing calculation and this simulation study versus measurement.

Keywords: Stray losses, eddy current losses, 3D Finite Element Methode.

1. PENDAHULUAN

Transformator adalah peralatan terpenting dalam sistem kelistrikan, ada spesifikasi dan garansi yang harus dipenuhi, karena ada konsekuensi pinalti yang harus diperhatikan oleh pabrikan transformator di dalam membuat produk, sering terjadi garansi terlewat dari yang disepakati dan menyebabkan transformator kurang kompetitif yang disebabkan didalam proses perhitungan sering menggunakan data transformator tiga fasa, kemudian secara sederhana dibagi tiga untuk menghitung kerugian [1] tambahan transformator satu fasa dan secara aktual ketika dilakukan pengukuran kerugian [2] berbeban pada transformator daya satu fasa tidak bisa sederhana, hanya dengan dibagi tiga fasa saja dan terbukti ada perbedaan yang besar antara pengukuran dan perhitungan kerugian [2] berbeban yang didalamnya termasuk kerugian tambahan (*stray*

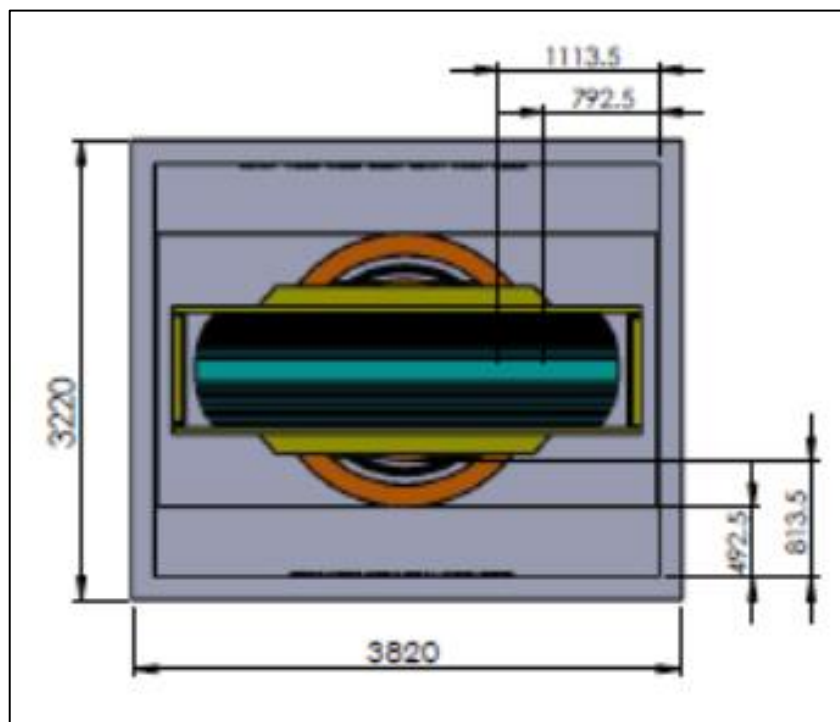
losses) yang terjadi pada struktur transformator.

Transformator adalah peralatan listrik yang dinilai mempunyai efisiensi yang sangat baik diatas 99% [3]. Secara garis besar kerugian yang terjadi pada semua transformator daya baik tiga fasa maupun satu fasa. Ada dua rugi tanpa beban (inti) dan rugi berbeban (belitan) , dimana pada kerugian inti ada rugi histerisis dan rugi arus eddy, sedangkan pada kerugian tembaga terdapat rugi tembaga (I^2R) dan rugi tambahan (*stray losses*) akibat adanya arus eddy yang menyebabkan flux bocor dan mengenai struktur rangka, *cover*, *flitch plate* dan *core clamp* dan belitan itu sendiri menyebabkan kerugian tambahan [4].

Predictive flux bocor dan simulasi kerugian tambahan pada struktur transformator sangat diperlukan untuk mendapatkan nilai kerugian tambahan yang lebih [3], mendapatkan nilai kerugian tambahan yang mendekati pengukuran, mengetahui karakteristik kerugian tambahan pada struktur transformator dengan menggunakan 3D *Finite Element Method* [2] dengan basis software ANSYS, hingga mendapatkan transformator yang kompetitif dan memenuhi spesifikasi.

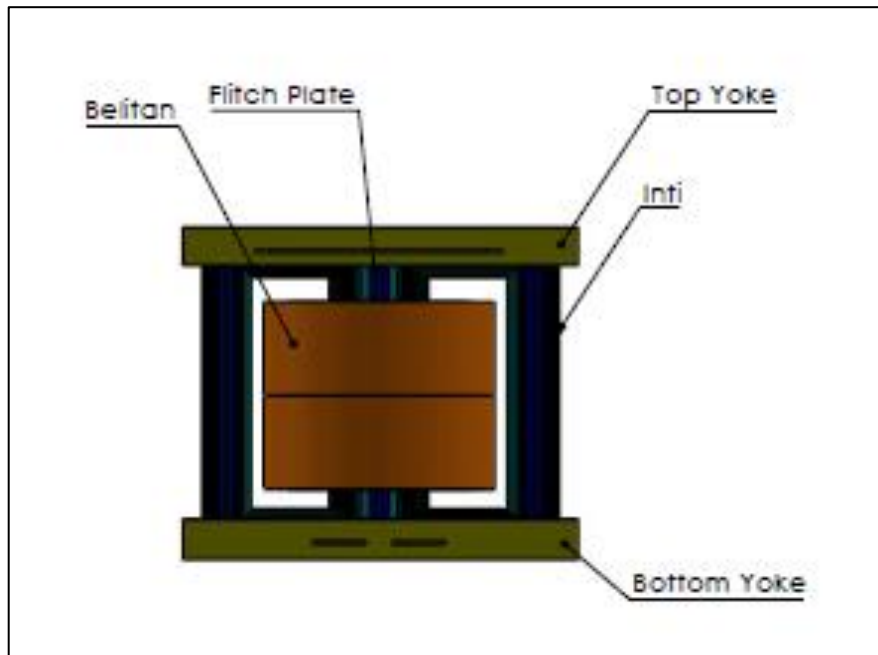
1.1 MODEL TRANSFORMATOR

Pada penelitian ini menggunakan transformator daya satu fasa 275 kV 83.3 MVA dengan tipe inti dan mempunyai tiga kaki inti, dimana semua belitan transformator berada pada inti tengah, baik belitan HV, FR, LV dan TV. Dimana pada penelitian ini membahas analisa kerugian [5] tambahan pada struktur transformator, yaitu: tangki, *flitch plate*, *core clamp* [6].



Gambar 1. Model transformator daya satu fasa.

Proses analisa dibatas pada tangki trafo, *core clamp*, *flitch plate*, pada gambar 2. Inti, *winding*, *core clamp* (*clamping yoke*) transformator.



Gambar 2. Bentuk belitan transformator.

2. METODE.

Dengan menggunakan persamaan maxwell, persamaan ini menjadi pasti, ketika hubungan antara jumlah kuat medan magnet dan kerapatan flux magnet [1] diketahui:

$$D = \epsilon\epsilon_0 E \tag{1}$$

$$B = \mu_r \mu_0 H \tag{2}$$

$$J = \sigma E \text{ (Hukum Ohm)} \tag{3}$$

Dimana :

- ϵ : Relative permittivity
- μ_r : Relative permeability magnet, struktur 200
- σ : Konduktivitas elektrik (S/m), 6.5×10^6
- B : Kerapatan flux magnet (Wb/ m² = Tesla)
- μ_0 : Permeabilitas vacum, $4\pi \times 10^{-7}$ H/m atau Wb/ (Axm)
- E : Intensitas area magnet listrik (V/m)
- D : Kerapatan flux listrik (C/m²)
- J : Kerapatan muatan listrik (A/m²)
- H : Intensitas area magnet (A/m)

Perhitungan arus eddy didahului dengan analisis yang akurat pada *stray losses* di bagian struktur. Transformator, pada *core clamp*, *fitch plate*, *cover*, dan tangki transformator daya. Karena transformator daya dioperasikan pada rentang frekuensi rendah, arus perpindahan tidak dianggap. Ketika arus AC mengalir dalam belitan transformator, persamaan yang digunakan untuk memecahkan masalah elektromagnetik akibat arus eddy dinyatakan sebagai berikut:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\Delta \times A) = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \tag{4}$$

Dimana:

- A : Potensial vektor magnetik.
 μ : Permeability.
 J_s : Kerapatan arus pada belitan.

2.1. Kedalam kulit (*skin depth*).

Efek kulit adalah efek yang disebabkan mengalirnya arus pada saat frekuensi tertentu pada permukaan konduktor dengan kata lain induksi arus medan magnet yang memungkinkan menembus konduktor untuk kedalaman tertentu. Efek ini diperlukan untuk menghitung arus eddy di struktur trafo. Dalam penerapan *finite element method*, ke dalam kulit (*skin depth*) diperhitungkan. Kepadatan arus dan kedalaman kulit (*skin depth*) yang mempertimbangkan efek kulit dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$J = J_0 e^{-\frac{d}{\delta}} \quad (5)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_0 \mu_r}} \quad (6)$$

Dimana:

- δ : *Skin depth* (meter).
 ω : Frekuensi sudut, $2\pi f$ (rad/s).
 d : Jarak (meter).

Kerugian pada bagian *core clamp*, *flich plate* dan tangki transformator daya akibat arus eddy. Kerugian ini disebut kerugian tambahan (*stray losses*) dan besarnya diatur oleh *stray flux* (flux liar), frekuensi, konduktivitas dan permeabilitas material. Efek kulit hanya 2 mm dari 10 mm tebal struktur atau seperlima (0.2) dari tebal plate struktur trafo, maka kuantitas *stray losses* dinyatakan sebagai berikut:

$$P = \sqrt{\frac{\omega \mu}{8\sigma}} H_{tm}^2 \quad (7)$$

Dimana:

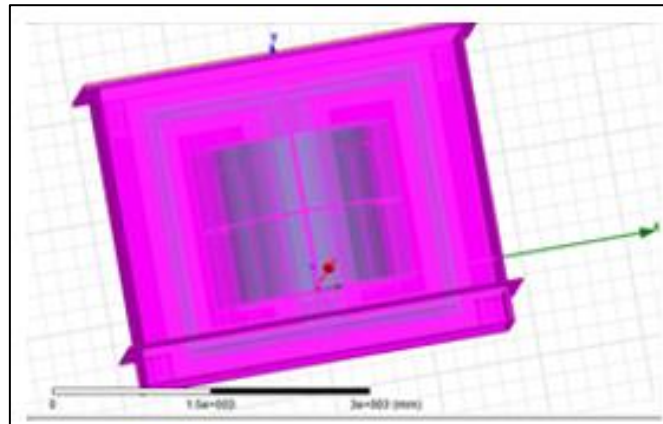
- P : Eddy losses (watt)
 H_{tm} : Nilai maksimum Intensitas medan magnet (A/m).

Analisa metoda elemen hingga 3D [2] diperlukan untuk menyelesaikan persamaan differensial diatas.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

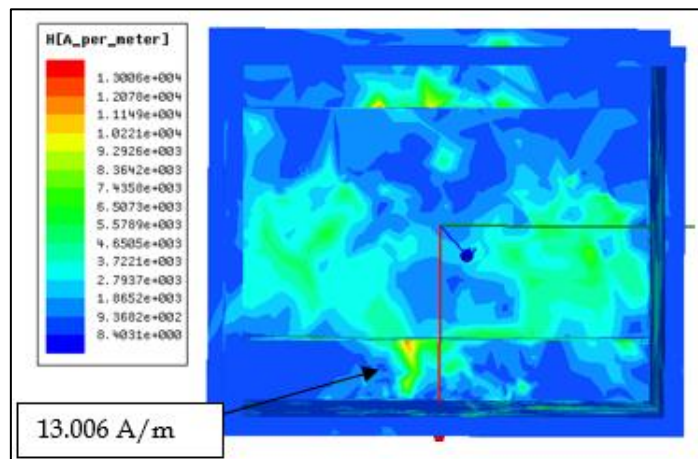
Sebelum melakukan simulasi perlu membuat moden dan model bisa dibuat secara langsung pada *software ansys* atau dapat mengambil dari software lain [7], untuk menunjang perhitungan tersebut menggunakan data *solidworks*, parameter yang dibutuhkan dimasukan seperti:

1. Arus pada lilitan primer.
2. Arus pada lilitan sekunder.
3. Properti material (*Relative Permeability, Conductivity*)

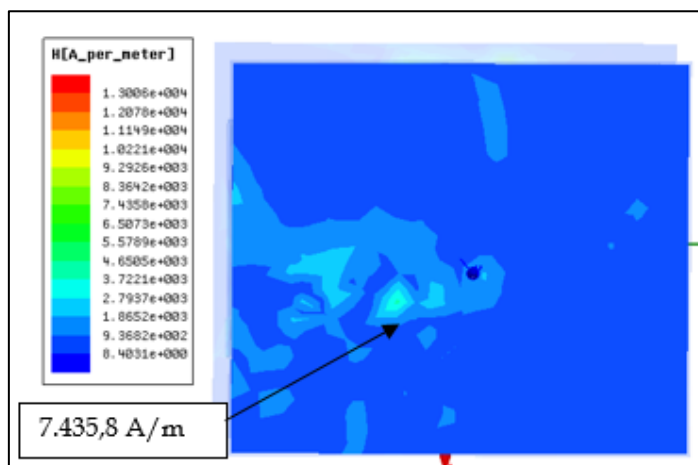


Gambar 3. Model dari Solidwork.

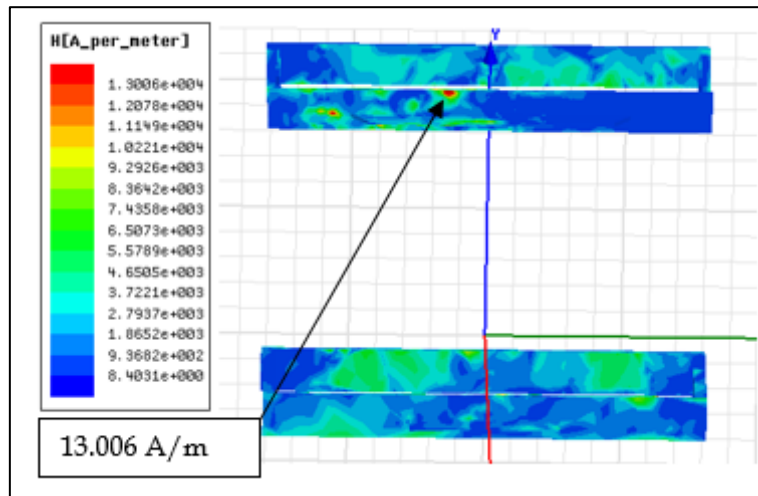
Gambar 4 tampilan simulasi intensitas medan magnet (H), memperapat flux magnet (B) agar mendapatkan *stray losses* pada struktur trafo.



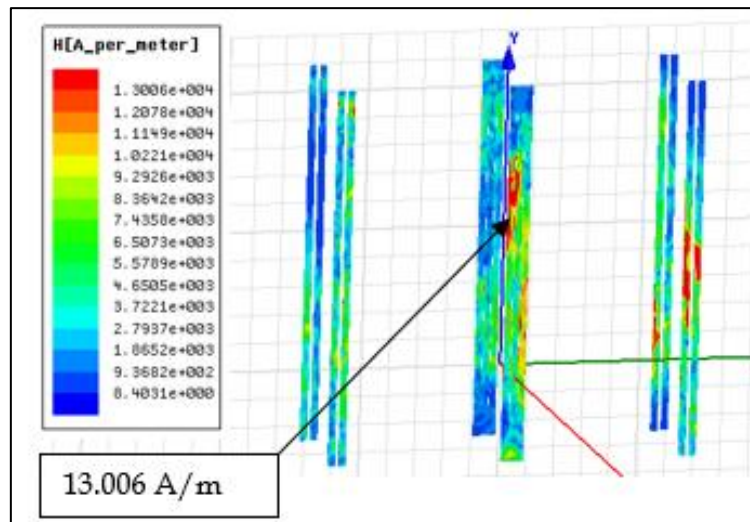
Gambar 4. Tampilan simulasi (H) intensitas medan magnet (A/m) pada tangki.



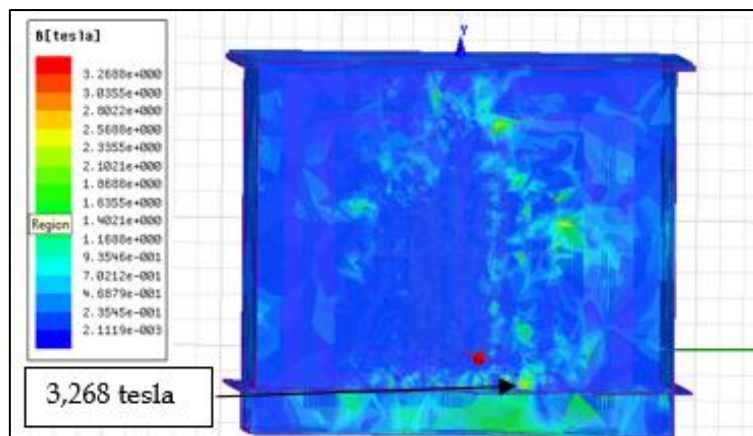
Gambar 5. Tampilan simulasi (H) intensitas medan magnet (A/m) pada Cover.



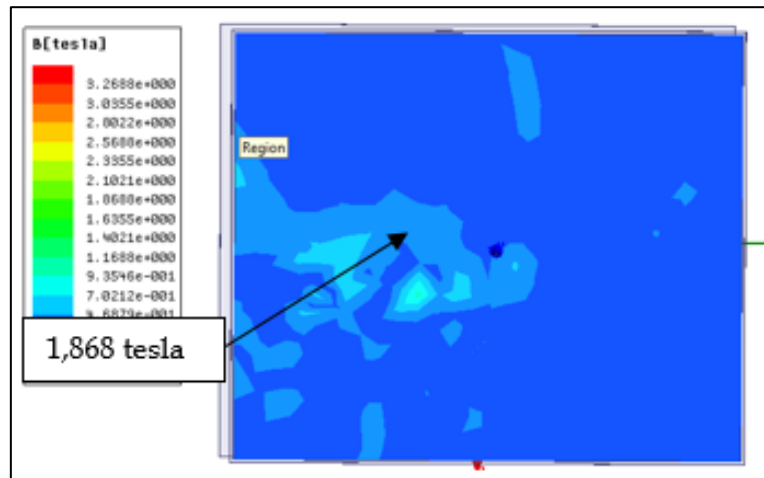
Gambar 6. Tampilan simulasi (H) intensitas medan magnet (A/m) pada *core clamp*.



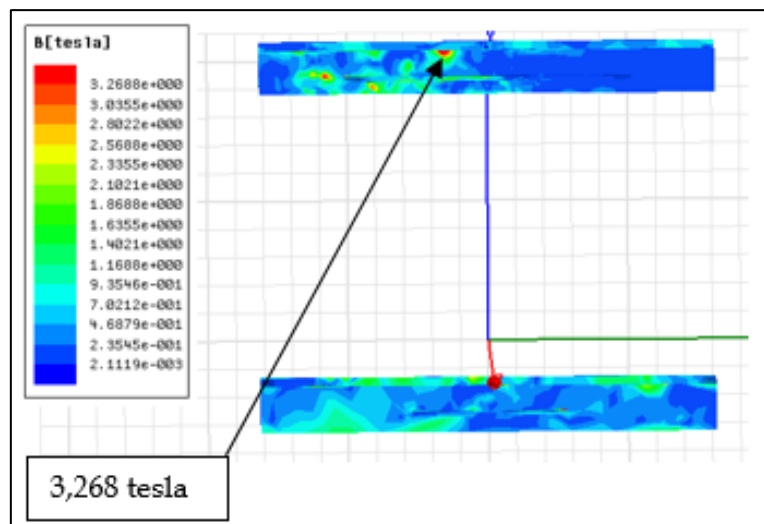
Gambar 7. Tampilan simulasi (H) intensitas medan magnet (A/m) pada *flitch plate*.



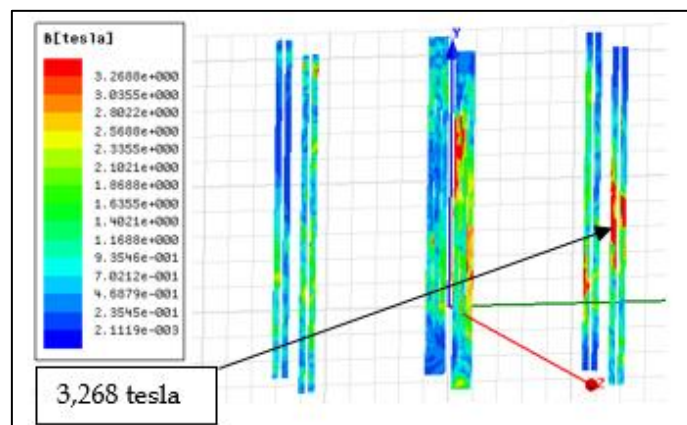
Gambar 8. Tampilan simulasi (B) kerapatan flux magnet (Wb/ m2 = Tesla) pada tangki.



Gambar 9. Tampilan simulasi (B) kerapatan flux magnet (Wb/ m2 = Tesla) pada cover.



Gambar 10. Tampilan simulasi (B) kerapatan flux magnet (Wb/ m2 = Tesla) pada core clamp.



Gambar 11. Tampilan simulasi (B) kerapatan flux magnet

(Wb/ m² = Tesla) pada *flitch plate*.

3.1 Hasil pengukuran.

Uji kerugian pada beban (*Load Losses*) [8] untuk mengetahui seberapa besar kerugian tembaga I^2R pada saat dibebani arus nominal dan kerugian tambahan (*stray losses*) [9] pada belitan struktur transformator akibat kebocoran flux [2] di pengujian ini dan disebut juga dengan pengujian rangkaian tertutup (*short circuit*). Untuk mengetahui *stray losses* (kerugian tambahan) didapat pada pengujian hubung singkat (*short circuit*), didalam persamaan dituliskan sebagai berikut:

$$P_{II} = P_c + P_{ec} + P_{osl} = R_{dc} \cdot I^2 + P_{ec} + P_{osl} \quad [\text{Watt}] \quad (8)$$

Dimana:

- P_{II} : Rugi berbeban total
- P_c : Rugi tembaga (pada lilitan primer dan sekunder)
- P_{ec} : Rugi arus pusar pada kumparan
- P_{osl} : Rugi-rugi pada struktur tangki dan belitan akibat kebocoran medan magnet.

Pada penelitian ini memfokuskan pada *stray losses* [10] (kerugian tambahan) pada bagian struktur transformator yang ditampilkan pada tabel 1, kemudian untuk mengetahui total *stray losses* secara keseluruhan, dibawah perbandingan *stray losses* (kerugian tambahan) antara perhitungan menggunakan *software iTrac*, simulasi dengan *software ansys* [11] dan pengukuran yang ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 1. Simulasi *stray losses* pada struktur trafo.

No	Bagian struktur Trafo	Ps tray (watt)
1	Tangki	6,441,436
2	Cover	2,105,352
3	Core Clamp	6,441,436
4	Flitch Plate	6,441,436
Total		21.429,66

Tabel 2. Perbandingan *stray losses* dan total *losses* pada trafo.

Hasil	Total Stray (kW)	Total Losses (kW)	Presentasi <i>stray losses</i> vs total <i>losses</i>
Design	33,510	111,770	30%
Simulasi	37,033	113,530	33%
Pengujian	44,486	122,056	37%

Model yang terbuat, sehingga kerugian pada struktur yang di simulasi dengan hasil pengukuran. Hasil simulasi nilainya lebih kecil dari pengukuran, hal ini karena kerugian eddy [12] pada struktur trafo yang disimulasikan, adapun kerugian tambahan pada belitan tidak

disimulasikan. Mempertimbangkan alasan-alasan ini, hasil simulasi yang dilakukan mendapatkan nilai pengukuran dengan baik.

4. SIMPULAN

Hasil analisis yang didapat dengan menggunakan analisa elemen hingga konsisten dengan analisis teoritis, menggambarkan validitas metode. Ada perbaikan pada simulasi analisa *stray losses* dibandingkan dengan perhitungan desain sekitar 9.05% terhadap hasil pengukuran. Berdasarkan hasil perhitungan desain, simulasi analisa dan pengukuran *stray losses* adalah 30%-37%.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. C. Olivares-Galvan, E. Campero-Littlewood, J. L. Hernandez-Avila, R. Escarela-Perez, S. M. Adame, and A. D. Theocharis, "Evaluation of stray losses in throats of distribution transformers using finite element simulation," *Proc. 6th Andean Reg. Int. Conf. Andescon 2012*, pp. 7–10, 2012.
- [2] M. Singh, M. Verma, A. Kanaujia, S. Rai, and A. Soman, "Reduction of Stray Losses in Distribution Transformer using different materials of Clamping," pp. 5–7, 2018.
- [3] L. Kralj and D. Miljavec, "Stray losses in power transformer tank walls and construction parts," *19th Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2010*, no. October, pp. 1–5, 2010.
- [4] J. H. Harlow, "HfCTRIC POWfH TRANSfORMfR fNGINHRING Edited by," pp. 1–6, 2012.
- [5] T. Orosz, "Evolution and modern approaches of the power transformer cost optimization methods," *Period. Polytech. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 63, no. 1, pp. 37–50, 2019.
- [6] Z. Janic, Z. Valkovic, and Z. Stih, "Stray Losses in Transformer Clamping Plate," *2006 12th Bienn. IEEE Conf. Electromagn. F. Comput.*, pp. 1–5, 2006.
- [7] T. Orosz, D. Pánek, and P. Karban, "FEM Based Preliminary Design Optimization in Case of Large Power Transformers," *Appl. Sci.*, no. Figure 2, 2020.
- [8] G. P. P, "A Review about Testing of Distribution Transformers," *Int. J. Adv. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 165–177, 2011.
- [9] S. Magdaleno-Adame, P. Penabad-Duran, J. C. Olivares-Galvan, S. Maximov, R. Escarela-Perez, and E. Campero-Littlewood, "Reduction of stray losses in tertiary voltage bushings in power transformer tanks," *2014 IEEE Int. Autumn Meet. Power, Electron. Comput. ROPEC 2014*, pp. 5–9, 2014.
- [10] K. V Dave, S. M. Kanani, and E. Engineering, "USE OF FEM FOR REDUCTION OF TRANSFORMER STRAY LOSS 1 Lecturer , Department of Electrical Engineering , AVPTI , Rajkot," vol. 5, no. 2, pp. 509–514, 2016.
- [11] A. In and T. Issue, "Exc Ellence in Eng I Ne E R I Ng Si M U L At Io N," *Ansys Advant.*, vol. V, no. 3, 2011.
- [12] M. C. Hlatshwayo, "The Computation of Winding Eddy Losses in Power Transformers Using Analytical and Numerical Methods," 2013.