

Pemodelan Transformator Satu Fasa Nonlinear Menggunakan MATLAB

Raka Maulana Raharjo¹, Wahyudi Budi Pramono ST., M.Eng.²

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Indonesia
Jl Kaliurang KM 14.5 Yogyakarta, Indonesia

¹15524008@students.uui.ac.id

²985240104@uui.ac.id

Fenomena yang sering terjadi pada saat penyalaan awal transformator yang terhubung ke beban yaitu munculnya lonjakan arus yang sangat besar mencapai 10 – 100 kali dari arus nominalnya. Fenomena ini dapat menyebabkan kerugian seperti malfungsi operasi dari relay proteksi, penurunan tegangan (*Voltage dip*), merusak gulungan (*windings*) transformator, bahkan menyebabkan resonansi harmonik sehingga menyebabkan rusaknya peralatan kelistrikan yang tersambung. Kerugian tersebut bukan hanya itu saja, pada pengujian lapangan bahkan dapat menyebabkan *error* pada pengambilan data saat berjalan serta saat pasca pengambilan data. Dikarenakan alasan tersebut maka pemodelan mengenai transformator yang digunakan perlu dibuat untuk keperluan studi arus *inrush* sehingga dapat diketahui arus saat lonjakan awalnya yang sesuai dengan teori mengenai arus *inrush*. Pemodelan pada penelitian ini dibuat berdasarkan transformator satu fasa 1:1 yang parameter sirkuitnya direferensi berdasarkan sisi primer serta tidak lupa juga untuk disertakan karakteristik intinya. Hasil dari simulasi pemodelan penelitian ini menyatakan bahwa pada saat pergeseran sudut fasa tegangan 0° , arus *inrush* berada pada nilai tertinggi yaitu 54 Ampere, sedangkan pada saat pergeseran sudut fasa tegangan 90° , arus *inrush* berada pada nilai yang rendah yaitu sebesar 29,4 Ampere. Berdasarkan hasil simulasi tersebut, karena sesuai dengan teori pergeseran sudut fasa tegangan maka dapat dinyatakan bahwa hasil arus *inrush* simulasi merupakan hasil yang valid. Apabila dibandingkan dengan hasil pengujian lapangan yang telah diurutkan mengikuti besaran nilai hasil simulasi, hasil pengukuran dilapangan mempunyai nilai kesalahan relatif sebesar 0,84 Ampere.

Kata Kunci: Transformator, Arus *Inrush*, Pemodelan Transformator Satu fasa

I. PENDAHULUAN

Penggunaan teknologi pada masa industri sekarang tidak terlepas dari pemakaian energi listrik sehingga proses pembangkitan tenaga listrik perlu dijaga realibitas dan kestabilannya. Instrumen yang sering dipakai untuk mentransformasikan tegangan maupun arus merupakan transformator. Dimana pada penggunaan transformator ini sering terjadi lonjakan arus pada saat penyalaan awal transformator yang dihubungkan ke beban, lonjakan arus tersebut kira-kira bernilai sebesar 10 – 100 kali dari arus nominalnya[1].

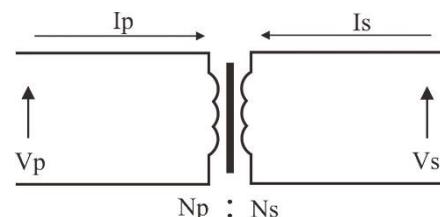
Hal ini banyak menyebabkan kerugian pada proses pembangkitan listrik[2], selain itu pengujian arus *inrush*

dilapangan dapat terjadi *error* pada pengambilan data saat berjalan serta pada saat pasca dilakukan pengambilan data sehingga sulit menentukan nilai arus *inrush* yang valid[3]. Oleh karena alasan tersebut maka perlu dibuat suatu pemodelan mengenai transformator yang digunakan sehingga arus *inrush* dapat diuji secara aman serta dapat diketahui secara pasti nilai arus lonjakan awal yang terjadi. Diharapkan berdasarkan pemodelan yang dibuat hasilnya dapat menjadi acuan dalam merancang strategi untuk mereduksi arus *inrush* secara tepat

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Transformator Satu Fasa

Transformator adalah instrumen kelistrikan untuk mengkonversi tegangan maupun arus dari tinggi ke rendah maupun sebaliknya. Secara teori, pada transformator satu fasa ideal, dengan asumsi rugi-ruginya diabaikan, perbandingan belitan antara kedua sisinya sama dengan perbandingan tegangan pada kedua sisi primer dan sisi sekunder, selain itu daya listrik pada keluaran primer sama dengan daya listrik pada keluaran sekunder. Hal ini dapat ditunjukkan seperti pada gambar berikut:

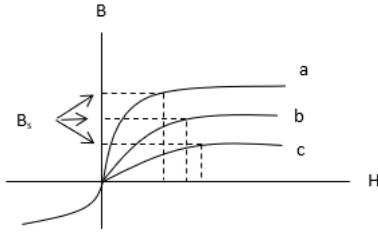


Gambar 1 Rangkaian transformator satu fasa ideal

B. Karakteristik Inti Transformator (B-H)

Gaya kemagnetan H , sering disebut dengan kuat medan magnet, atau sering juga disebut dengan intensitas medan magnet. Sedangkan induksi magnet B sering disebut dengan rapat fluks magnet atau rapat garis gaya magnet. Grafik induksi magnet B versus gaya kemagnetan H merupakan hal yang sangat penting dalam mempelajari kasus arus *inrush* karena hubungan $B-H$ mengindikasikan adanya arus *inrush*. Apabila nilai I_o dinaikkan maka nilai H akan naik. Tetapi bila I_o terus dinaikkan sampai pada nilai H tertentu, nilai B tidak lagi banyak berubah. Kondisi ini dikatakan sebagai kondisi jenuh atau saturasi dimana inti tidak lagi mampu menampung

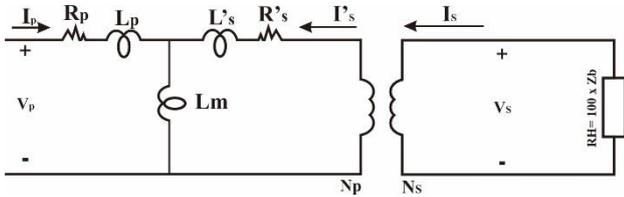
fluks magnet dan rapat fluks magnet, B juga menjadi jenuh atau disebut juga fluks bersama saturasi. Dalam kondisi tersebut, walaupun arus I_o dibesarkan dan nilai H naik namun harga B akan tetap, hal ini dijelaskan pada gambar:



Gambar 2 Kuva B-H saturasi

C. Pemodelan Matematika Transformator Satu Fasa

Dalam Analisis biasanya perangkat keras kelistrikan dimodelkan dengan suatu rangkaian ekivalen yang sesuai, hal ini berlaku juga dalam pembuatan parameter masukan pemodelan. Pemodelan yang akan dibuat akan berdasarkan referensi sisi primer, untuk mengetahui gambaran pemodelan yang dibuat:



Gambar 3 Representasi Rangkaian Pemodelan

Karena adanya karakteristik inti pada transformator satu fasa, maka tegangan yang terinduksi sama dengan perubahan waktu yang terjadi pada fluks bersama di masing-masing belitan, tegangan yang terinduksi di masing-masing belitan akan ditulis sebagai berikut[4]:

$$V_p = I_p \cdot R_p + \frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \quad (1)$$

$$V'_s = I'_s \cdot R'_s + \frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d\phi'_s}{dt} \quad (2)$$

Untuk nilai I_p dan I'_s merupakan nilai fluks masing-masing belitan yang dikurangi oleh fluks bersama yang terjadi pada transformator dibagi dengan nilai reaktansi sendiri pada masing-masing belitan atau bisa diekspresikan sebagai[4]:

$$I_p = \frac{\phi_p - \phi_m}{x_{lp}} \quad (3)$$

$$I'_s = \frac{\phi'_s - \phi_m}{x'_{ls}} \quad (4)$$

Untuk nilai R_p didapat langsung dari spesifikasi transformator jika ada, jika tidak maka harus dicari berdasarkan *Short Circuit Test*, lalu untuk nilai R'_s karena direferensi berdasarkan sisi primer maka nilainya dicari dengan persamaan[4]:

$$R'_s = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \times R_s \quad (5)$$

Untuk nilai dari x_{lp} dan x'_{ls} merupakan kebocoran fluks yang hadir di kedua sisi primer dan sekunder. Kebocoran ini menimbulkan kebocoran reduksi pada kedua sisi, karena direferensi berdasarkan sisi primer maka nilainya dicari dengan persamaan[4]:

$$x_{lp} = x'_{ls} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_p \quad (6)$$

Nilai L_p dicari dengan *Short Circuit Test* apabila tidak tertera dari spesifikasi, karena inti dari transformator merupakan parameter yang sangat penting maka dengan menggunakan persamaan (3) dan (4) untuk mengganti arus, persamaan (1) dan (2) dapat diekspresikan sebagai persamaan integral jumlah dua fluks bersama yaitu[4]:

$$\phi_p = \int \left\{ \omega_b \cdot V_p - \omega_b \cdot R_p \cdot \left(\frac{\phi_p - \phi_m}{x_{lp}} \right) \right\} dt \quad (7)$$

$$\phi_s = \int \left\{ \omega_b \cdot V'_s - \omega_b \cdot R'_s \cdot \left(\frac{\phi'_s - \phi_m}{x'_{ls}} \right) \right\} dt \quad (8)$$

Dimana:

Persamaan (7) dan (8) nantinya akan menjadi salah satu blok pada alur kalkulasi otomatis fluks bersama di Simulink yang akan bersambung ke persamaan keluaran i_1 dan i'_2 .

Hasil B yang merupakan fluks nilainya tidak banyak berubah ketika, H mengalami saturasi maksimum maka nilai B ketika kondisi saturasi adalah fluks bersama sama dengan fluks bersama saturasi, sehingga persamaan arus (3) dan (4) dapat diekspresikan sebagai berikut[4]:

$$I_p = \frac{\phi_p - \phi_m^{sat}}{x_{lp}} \quad (9)$$

$$I'_s = \frac{\phi'_s - \phi_m^{sat}}{x'_{ls}} \quad (10)$$

Persamaan (9) dan (10) ini nantinya merupakan salah satu blok keluaran pemodelan dari nilai I_p dan I'_s berupa sinyal arus. Pada simulasi, nilai dari ϕ_m^{sat} akan ditentukan berdasarkan dari nilai ϕ_m^{unsat} yang mana hal ini dihitung pada nilai x_{mp}^{unsat} atau yang sering disebut juga dengan reaktansi magnetisasi yang tidak saturasi dari *open circuit test*, jika dituliskan hubungan antara nilai fluks tidak saturasi dan saturasi berdasarkan perubahan flux adalah[4]:

$$\phi_m^{unsat} = \phi_m^{sat} + \Delta\phi \quad (11)$$

Dimana ekspresi persamaan fluks tidak saturasi yang digunakan bergandengan dengan arus masuk pada sisi primer dan sisi sekunder referensi primer atau bisa dituliskan[4]:

$$\phi_m^{unsat} = x_{mp}^{unsat} (I_p + I'_s) \quad (12)$$

Ekspresi dari persamaan (12) dapat dituliskan kembali sebagai berikut apabila nilai dari I_p dan I'_s disubstitusi dari persamaan (9) dan (10)[4]:

$$\frac{\phi_m^{unsat}}{x_{mp}^{unsat}} = \frac{\phi_p - \phi_m^{sat}}{x_{lp}} + \frac{\phi'_s - \phi_m^{sat}}{x'_{ls}} \quad (13)$$

Lalu, untuk persamaan arus nilainya masih nilai saturasi sehingga apabila mengganti Φ_m^{unsat} dengan $\Phi_m^{sat} + \Delta\Phi$ dan dikumpulkan persamaan Φ_m^{sat} maka didapatkan[4]:

$$\Phi_m^{sat} = xM \left(\frac{\Phi_p}{x_{lp}} + \frac{\Phi'_s}{x'_{ls}} - \frac{\Delta\Phi}{x_{mp}^{unsat}} \right) \quad (14)$$

Dimana nilai dari xM (reaktansi magnetisasi saturasi) pada kasus tidak saturasi adalah[4]:

$$\frac{1}{xM} = \frac{1}{x_{mp}^{unsat}} + \frac{1}{x_{lp}} + \frac{1}{x'_{ls}} \quad (15)$$

Persamaan (14) nantinya akan menjadi blok untuk perhitungan fluks saturasi terhadap waktu yang berulang dimana waktu berhenti simulasi akan diatur oleh coding *tstop* atau “waktu berhenti.”

Dimana:

- V_p : tegangan sisi primer (Volt)
- V'_s : tegangan sisi sekunder referensi sisi primer (Volt)
- I_p : arus sisi primer (Ampere)
- I'_s : arus sisi sekunder referensi sisi primer (Ampere)
- R_p : resistansi sisi primer (Ω)
- R'_s : resistansi sisi sekunder referensi sisi primer (Ω)
- ω_p : frekuensi fundamental (rad)
- $\frac{d\Phi}{dt}$: perubahan fluks terhadap waktu
- Φ_p : fluks bocor sisi primer (Tesla)
- Φ'_s : fluks bocor sisi sekunder referensi sisi primer (Tesla)
- Φ_m/Φ_m^{unsat} : fluks bersama (Tesla)
- Φ_m^{sat} : fluks bersama pada saat kondisi saturasi/psiat (Tesla)
- $\Delta\Phi$: Perubahan fluks saturasi/Dpsi (Tesla)
- x_{mp}^{unsat} : reaktansi magnetisasi tidak saturasi dari OCT (Ω)
- xM : reaktansi magnetisasi saturasi (Ω)
- x_{lp} : reaktansi sisi primer (Ω)
- x'_{ls} : reaktansi sisi sekunder referensi sisi primer (Ω)
- L_p : induktansi sisi primer (Henry)
- f : frekuensi fundamental (Hz)

D. Persamaan Parameter Masukan

Persamaan-persamaan berikut merupakan persamaan tambahan yang digunakan dalam mengkonversi suatu nilai ke nilai yang lain serta untuk kepentingan parameter masukan pada pemodelan:

1. Persamaan ini merupakan persamaan yang digunakan pada blok masukan sinyal sinus v_1 di Simulink dimana frekuensinya yang tadinya dalam bentuk *Hertz* harus diubah ke bentuk kecepatan sudut atau *rad/s*:

$$\omega = 2\pi x f \quad (16)$$

2. Persamaan ini merupakan persamaan yang digunakan pada blok masukan sinyal sinus v_1 di Simulink dimana sudut fasa tegangan yang tadinya berfungsi sebagai pergeseran sudut fasa tegangan dalam bentuk derajat harus diubah ke bentuk rad:

$$rad = \left(\frac{\pi}{180^\circ} \right) x \quad (17)$$

3. Persamaan ini merupakan persamaan yang digunakan dalam menghitung parameter masukan yang digunakan pada *coding* pemodelan dimana representasi impedansi nantinya di pemodelan akan menjadi beban pada kasus arus *inrush*, persamaan tersebut diekspresikan sebagai:

$$Z_b = \frac{V_p^2}{P} \quad (18)$$

4. Persamaan ini merupakan persamaan yang digunakan dalam menghitung parameter masukan yang digunakan pada *coding* pemodelan dimana masukannya merupakan nilai tegangan puncak dari rating nilai tegangan pada sisi primer, persamaan tersebut diekspresikan sebagai:

$$V_{pk} = V_p x \sqrt{2} \quad (19)$$

5. Persamaan ini merupakan persamaan yang digunakan dalam menghitung parameter masukan yang digunakan pada *coding* pemodelan dimana masukannya berguna pada simulasi Simulink untuk kalkulasi otomatis bersama dengan nilai fluks yang sudah dicari nilainya, persamaan reaktansi ini diekspresikan sebagai:

$$I_\mu = I_o x \sin \theta \quad (20)$$

$$x_m = x_o = \frac{V_o}{I_\mu} \quad (21)$$

Dimana:

- α : sudut fasa tegangan ($^\circ$)
- ω : kecepatan sudut (rad/s)
- Z_b : impedansi dasar berdasarkan sisi primer (Ω)
- P : rating daya transformator (VA)
- V_{pk} : tegangan puncak (Volt)
- I_μ : arus magnetisasi *OCT* (Ampere)
- I_o : arus hubung buka (Ampere)
- $\sin \theta$: nilai sinus dari sudut fasa faktor daya hubung buka
- $x_m = x_o$: reaktansi magnetisasi tidak saturasi (Ω)
- V_o : tegangan output hubung buka (Volt)

E. Arus Inrush

Ketika transformator disuplai dari sumber listrik (dienergisasi), maka dapat membangkitkan lonjakan arus yang sangat besar senilai 10-15 kali dari arus nominalnya[1].

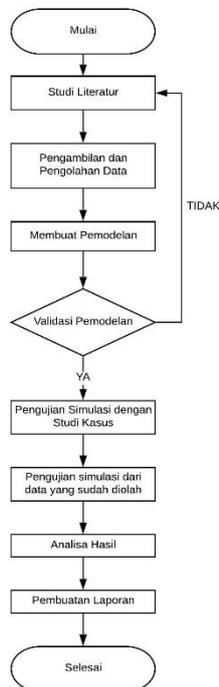
Faktor-faktor yang mempengaruhi arus *inrush*, antara lain:

1. **Pergeseran fasa tegangan pada saat awal transformator dinyalakan**, faktor ini berkaitan dengan fluks dimana pada saat pergeseran sudut fasa tegangan 0 derajat maka nilai arus *inrush* berada pada kondisi tertinggi dan pada saat pergeseran sudut fasa tegangan 90 derajat maka arus *inrush* berada pada kondisi yang rendah bahkan dalam beberapa kasus, pada sudut 90 derajat arus sudah berada pada kondisi nominal[5].
2. **Fluks Saturasi**, faktor ini berkaitan dengan kurva karakteristik inti transformator yaitu kurva B-H

dimana kurva ini menunjukkan saturasi dari fluks yang mana apabila sesuai teori “jika nilai fluks saturasi pada kurva B-H rendah maka arus yang dibangkitkan pun kecil bahkan mendekati nilai nominal/steady state, sebaliknya jika nilai fluks saturasi pada kurva B-H tinggi maka arus yang dibangkitkan menunjukkan adanya lonjakan”, pada prinsipnya transformator bekerja pada fluks saturasi normal $\pm 1.5 - 1.7$ Tesla[5].

3. **Ukuran Rating Transformator**, faktor ini berkaitan dengan pembuatan pada transformator mengenai rating transformator dimana impedansi dan resistansi pada transformator dengan rating besar cenderung memiliki nilai yang kecil sedangkan pada transformator dengan rating kecil cenderung memiliki impedansi dan resistansi yang besar. Hal ini sebenarnya berimbas pada waktu berkurangnya nilai arus *inrush* menuju arus normal, untuk transformator dengan rating (<1000VA) maka arus *inrush* biasanya berkurang dalam waktu sekitar 0.1 detik, sedangkan pada transformator dengan rating besar arus *inrush* biasanya berkurang sekitar 1 detik bahkan bisa lebih lama[5].

III. METODE PENELITIAN

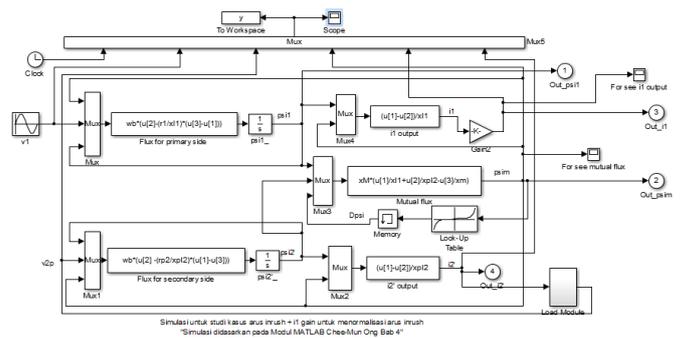


Gambar 4 Flow chart penelitian

Alur penelitian dimulai dengan studi literatur tentang pemodelan transformator dan arus *inrush* supaya mengerti teori pemodelan dan hasil arus *inrush*, setelah selesai melakukan studi literatur maka dilakukanlah pengambilan data lapangan mengenai *SCT*, *OCT*, serta arus *inrush* dan dari

pengambilan data tersebut ada yang diolah untuk masukan parameter simulasi, tahap selanjutnya merupakan pembuatan pemodelan dimana pemodelan ini bentuknya berupa *coding* dan simulink yang parameternya sudah ditentukan dan diketahui berdasarkan studi literatur, setelah selesai pembuatan pemodelan maka divalidasi terlebih dahulu apakah telah sesuai dengan studi literatur yang dilakukan, jika iya maka lanjut dan jika tidak sesuai dengan studi literatur maka pemodelan diulang dari belajar literatur lagi, pemodelan diuji menggunakan studi kasus dari modul buku Chee-Mun Ong *Chapter 4*, apabila telah bisa digunakan, maka simulasi dilanjutkan ke tahap pengujian dengan parameter dari transformator di laboratorium sistem ketenagaan, setelah didapatkan hasil arus *inrush*nya, hasil dibandingkan dengan data pengujian lapangan untuk validasi, kemudian setelah selesai menganalisa hasil, lanjut ke penulisan laporan skripsi.

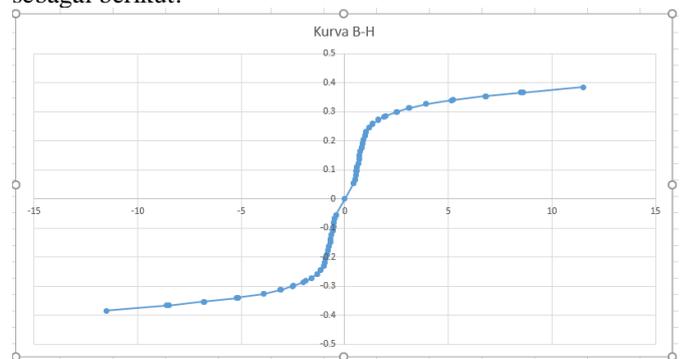
IV. HASIL DAN ANALISIS



Gambar 5 Pemodelan Simulink

Pemodelan untuk masukan parameter transformator satu fasa diambil dari spesifikasi transformator yang sudah diketahui, yaitu: tegangan primer/sekunder 220 Volt, arus hubung nol 0,47 Ampere, rating daya transformator 1500 VA, frekuensi 50 Hertz, lilitan primer/sekunder 154/169, resistansi primer 0,584 Ohm, resistansi sekunder 0,642 Ohm, induktansi primer 0,226 Henry, serta induktansi sekunder 0,278 Henry. Selain dari spesifikasi tersebut, data parameter masukan juga didapat dari uji lapangan *Open Circuit Test* serta *Short Circuit Test* untuk keperluan pengolahan data yaitu mencari nilai B-H (karakteristik inti transformator).

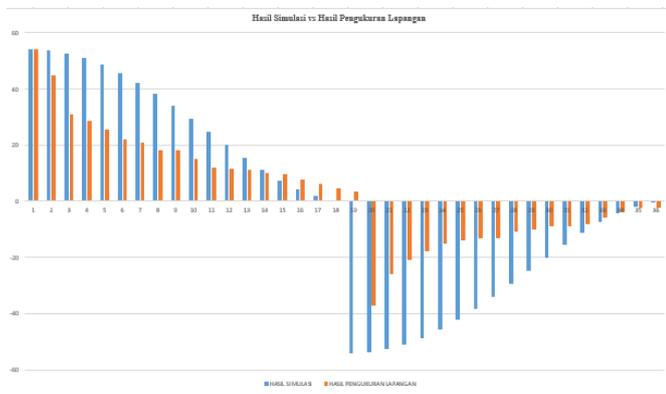
Untuk karakteristik transformatornya sendiri dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 6 Gambar grafik karakteristik inti transformator

Dari **Error! Reference source not found.** ini dapat terlihat bahwa nilai perubahan fluks saturasi (Dpsi) mengalami kenaikan yang signifikan mulai dari 0 – 12, sedangkan pada nilai fluks saturasi (psiat), mulai dari 0 kenaikannya signifikan lalu pada titik 0.327 nilai kenaikan psiat tersebut mulai jenuh atau dengan kata lain tidak bisa naik terlalu besar lagi. Kurva karakteristik yang diperlihatkan diatas menunjukkan adanya saturasi dan dapat dipastikan bahwa nilai arus awal akan mengalami lonjakan.

Berikut merupakan gambar grafik hasil simulasi *versus* hasil pengukuran lapangan yang sudah valid:



Gambar 7 Hasil simulasi (biru) vs hasil pengukuran lapangan (orange)

Dari gambar diatas dapat terlihat bahwa perbedaan arus *inrush* simulasi dan pengukuran lapangan lumayan berbeda, hal ini dikarenakan pada pengukuran lapangan terdapat fluks residu sedangkan pada hasil simulasi yang valid karena sesuai dengan dasar teori arus *inrush* hasilnya konstan mengikuti parameter masukan serta pengaturan sudut fasa tegangan, dengan asumsi bahwa fluks residu di semua sudut fasa tegangan bernilai nol.

Berikut merupakan tabel nilai perbandingan hasil simulasi dan hasil pengujian lapangan yang mendekati:

Tabel 1 Perbandingan hasil simulasi dan hasil pengujian lapangan

Pengaturan Sudut Fasa	Hasil Simulasi (A)	Hasil Lapangan (A)	Kesalahan Relatif
0°	54	54	0
130°	11.2061	10	0.107629
320°	-7.4603	-6	0.195743
330°	-4.3345	-4	0.077172

Berdasarkan data dari Tabel 1 Perbandingan hasil simulasi dan hasil pengujian lapangan, nilai dari simulasi sudah sesuai dengan teori pergeseran sudut fasa tegangan, diasumsikan sudah valid, sedangkan nilai arus *inrush* pada pengujian masih rancu dibandingkan dengan pergeseran sudut fasa tegangannya sehingga nilai hasil pengukuran arus *inrush* lapangan akan diurutkan sesuai dengan nilai seperti pada simulasi, hasilnya kedua hasil simulasi baik lapangan menjadi sesuai dengan teori pergeseran sudut fasa tegangan dimana nilai pada sudut 0° sama yaitu bernilai 54 Ampere. nilai kesalahan relatif paling

kecil ada pada nilai sudut fasa tegangan 320° sebesar 0,196 Ampere serta sudut fasa tegangan 330° sebesar 0,077 Ampere

V. KESIMPULAN

Pemodelan transformator nonlinear satu fasa dilakukan dengan memperhatikan dua parameter penting yaitu parameter masukan berupa representasi sirkuit ekivalen pada sisi primer serta sisi sekunder yang direferensi selain itu hal yang tidak kalah pentingnya merupakan nilai fluks pada intinya yang berasal dari kalkulasi nilai kerapatan fluks magnet dan kuat medan magnet. Hasilnya sesuai dengan teori pergeseran sudut fasa yang menunjukkan kevalidan nilai arus *inrush* yang disimulasikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. S. S. Dadhe and P. N. M. Lokhande, "A Review on Magnetizing Inrush current of Transformer," vol. 3, no. 3, pp. 212–214, 2017.
- [2] S. R. Chavan and M. S. Potdar, "Magnetic Inrush Current of Transformer Reduce By Point Wave Switching Method with MATLAB Simulation Results," vol. 4, no. 2, pp. 1–5, 2017.
- [3] H. Abdull Halim, T. Dao, and B. T. Phung, "Modeling Distribution Transformers for Inrush Transients Study," *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no. 10, pp. 6708–6714, 2016.
- [4] C.-M. Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using MATLAB.pdf." p. 626, 1998.
- [5] M. Simic, T. Sekara, and S. Jokic, "Model of Three-Limb Three-Phase Transformer Based on Nonlinear Open Circuit Characteristic with Experimental Verification," *Telfor Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 42–47, 2015.
- [6] I. M. Y. Negara, D. Fahmi, D. A. Asfani, and N. A. Kurniawan, "Effect of Core Cutting Topology on Inrush Current of Three-Phases Transformer," *3rd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2016*, pp. 69–74, 2017.
- [7] F. Aboura, A. S. Touhami, A. I. Zama, R. Tahmi, and O. Touhami, "Modeling of Single-Phase Core Type Transformer," *Proceedings - 2014 International Conference on Electrical Machines, ICEM 2014*, no. November 2016, pp. 2252–2256, 2014.
- [8] Suyamto, "Teori Perancangan Transformator." 2015.
- [9] S. Sudirham, "Transformator," pp. 1–20, 2011.
- [10] K. J. Patel, *Effects of Transformer Inrush Current Courses ENG4111 and ENG4112 Research Project Bachelor of Engineering (Power System)*. 2013.