

Pengaruh Variasi Proses Annealing Pada Performa *Core Losses* Trafo 1 Fasa E-I

Slamet Nurhadi^{a)}, Anang Dasa Nofvowan^{a)}, Satria Luthfi Hermawan^{a)}, Binar Surya Gumilang^{*a)}

(Received 27 April 2025 || Revised 28 Mei 2025 || Published 30 Juni 2025)

Abstract: Transformers have key role in converting voltage level to suit several applications, ranging from industries to residential areas. As part of the local content product production initiated by the government, it is essential to identify the material quality to yield good performance. Therefore, developing a well-designed core material is substantial to prevent excessive transformers core losses during operation. The core losses performance due to the annealing process of the silicon steel core is presented in this research. The E-I core shape is chosen to imitate the existing distribution transformers. The design aims for the optimal core losses of the EI transformers. The design process involves the selection of the iron core and calculating the number of coil turns on the primary and secondary sides. Based on experimental results, under the same number of winding turns, no significant change in transformers impedance due to the annealing process duration. Testing with a nichrome wire load shows that Transformers 1, with a flux density of 1, achieves efficiency and voltage regulation close to 100%. The second test with the addition of a rectifier indicates a decrease in efficiency and regulation, with Transformers 3 and a flux density of 1,6 providing the best results. The research findings show that a smaller flux density in transformer results in better efficiency and regulation for AC output, while a larger flux density supports better efficiency and voltage regulation for DC output. These findings can serve as a guide in designing EI Transformers for optimal battery charging systems.

Keywords: EI Transformers, nichrome wire, Non-sinusoidal Load, voltage regulation, Transformers efficiency

1. Pendahuluan

Transformator yang berfungsi untuk mentransfer dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian ke rangkaian lainnya tanpa mengubah frekuensi sistem, menjadi komponen kunci dalam sistem kelistrikan, baik pada jaringan distribusi maupun perangkat elektronik berdaya menengah seperti charger baterai dan *Uninterruptible Power Supply* (UPS) [1], [2], [3]. Efisiensi energi global sangat dipengaruhi oleh kualitas transformator karena rugi inti kerap menyumbang 25%–60% total rugi-rugi dalam operasi tanpa beban [4], [5], [6]. Pemerintah Indonesia menargetkan penurunan intensitas energi sebesar 1% per tahun [7], sehingga peningkatan performa transformator domestik memegang peranan strategis melalui optimalisasi proses *annealing* berpotensi memberikan penghematan energi signifikan pada skala nasional. Mengingat transformator satu fasa tipe E-I masih banyak diproduksi oleh industri lokal berskala kecil dan menengah [8], maka hal ini menjadi penting jika riset terfokus pada teknik produksi yang ekonomis namun mampu menghasilkan efisiensi tinggi untuk mendukung agenda transisi energi.

Permasalahan utama yang dihadapi produsen transformator skala menengah adalah tingginya rugi inti pada tegangan operasi nominal, yang berujung pada kenaikan suhu, penurunan keandalan, dan peningkatan biaya listrik pengguna akhir. Ketidakpastian parameter *annealing* terutama suhu, durasi, dan laju pendinginan sering menimbulkan ketidakhomogenan sifat magnetik antar *batch* produksi. Di sisi lain, tuntutan pasar terhadap transformator berukuran ringkas tetapi berkapasitas arus tinggi memaksa peningkatan densitas fluks yang justru memperbesar rugi inti jika tidak diimbangi perlakuan material yang memadai. Industri juga menghadapi keterbatasan perangkat ukur mutakhir, sehingga perlu metode karakterisasi yang sederhana namun valid untuk memantau hasil *annealing*. Masalah-masalah tersebut menegaskan pentingnya pedoman proses berbasis riset yang dapat diimplementasikan tanpa investasi peralatan mahal.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji hubungan antara suhu *annealing* dan penurunan kerugian inti. Zhang et al. menunjukkan bahwa *annealing* pada suhu menengah (sekitar 800 °C) pada Fe–Si *powder cores* mampu menurunkan *hysteresis*

loss secara substansial, hingga lebih dari 30%, serta menurunkan *eddy-current loss* dengan efek paling optimal pada kombinasi suhu dan tekanan tertentu [9]. Du et al. menyajikan model terhadap *leakage flux* dan rugi inti pada laminasi baja silikon, mendemonstrasikan bahwa distribusi fluks dan struktur mikro setelah *annealing* menentukan nilai *core loss* yang dihasilkan. Model ini divalidasi secara eksperimental dan menunjukkan akurasi tinggi dalam memprediksi penurunan rugi inti [10]. Kuhn et al. menggunakan metode *multiphysics simulations* menjelaskan pengaruh ukuran butir kristal dan ketebalan batas butir pada Fe-Si terhadap *hysteresis* dan *eddy-current loss* secara kuantitatif. Struktur mikro yang lebih besar dan batas butir tebal dapat meminimalkan kerugian magnetik, mendukung efektivitas *annealing* dalam peningkatan efisiensi material inti transformator [11]. Zhou et al. memperlihatkan bahwa *annealing* pada suhu optimal ± 980 °C dapat meningkatkan induksi magnetik dan menurunkan rugi inti secara nyata pada baja silikon non-oriented, dari 17.40 W/kg menjadi 15.75 W/kg pada 400 Hz [12]. Yuan et al. juga membuktikan bahwa kombinasi *normalizing* dan *final annealing* pada baja silikon berpadu Nb menghasilkan induksi magnetik tinggi ± 1.709 T dan *iron loss* sangat rendah (sekitar 2.63 W/kg pada 50 Hz) [13].

Akan tetapi belum banyak studi yang mengombinasikan analisis perlakuan suhu menengah (di bawah 500 °C) dengan skenario beban realistis berbasis harmonisa. Penelitian ini menawarkan konsep baru berupa skema *annealing* bersuhu menengah, yaitu 180 °C, 350 °C, dan 450 °C dengan durasi seragam 60 menit, diikuti pendinginan alami terkontrol untuk meminimalkan tegangan termal. Selain mengukur rugi inti menggunakan metode impedansi, penelitian ini menguji performa transformator pada tiga skenario beban realistis: beban linier resistif, penyearah gelombang penuh, dan inverter pulsa-lebar.

Tujuan utama penelitian ini adalah menetapkan suhu *annealing* optimal yang mampu meminimalkan rugi-rugi inti dan sekaligus mempertahankan regulasi tegangan pada transformator satu fasa tipe E-I berdaya 500 VA. Secara spesifik, penelitian ini bertujuan: (1) membandingkan perubahan rugi inti pada transformator kontrol dengan tiga sampel *annealing* bersuhu berbeda; (2) mengevaluasi efek *annealing* terhadap efisiensi keseluruhan pada beban linier,

*Korespondensi: binar.surya@polinema.ac.id

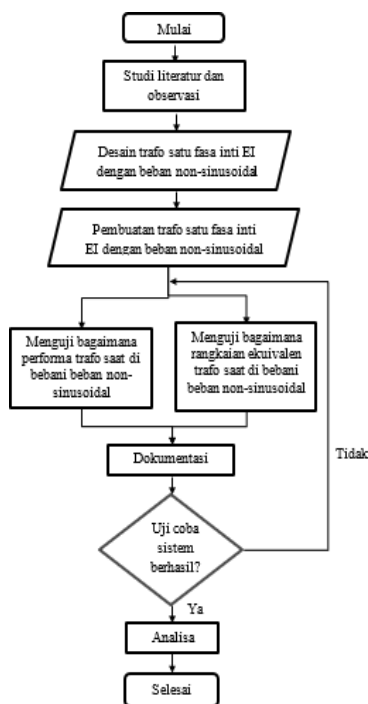
a) Prodi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Kota Malang, Indonesia

penyearah, dan inverter; serta (3) merumuskan rekomendasi proses annealing bersuhu menengah yang ekonomis bagi industri skala UMKM.

2. Metode Penelitian

2.1 Flowchart Penelitian

Diagram alir penelitian dapat dilihat di Gambar 2.1. Peneliti merancang transformator satu fasa inti EI dengan mempertimbangkan karakteristik beban non-sinusoidal yang mencakup dimensi inti, jumlah lilitan, serta estimasi rugi-rugi akibat bentuk gelombang arus dan tegangan yang tidak ideal. Tahap ini dilanjutkan dengan pembuatan prototipe transformator berdasarkan desain yang telah dirancang. Tahap pengujian pertama yaitu pengujian performa transformator secara langsung terhadap beban non-sinusoidal untuk mengevaluasi parameter seperti efisiensi, rugi inti, dan kestabilan tegangan. Pengujian selanjutnya yaitu model ekuivalen transformator, yang bertujuan menilai seberapa akurat rangkaian model mampu merepresentasikan karakteristik aktual transformator di bawah kondisi non-ideal. Selanjutnya, dilakukan evaluasi terhadap keberhasilan sistem secara keseluruhan. Jika pengujian menunjukkan hasil yang sesuai dengan tujuan dan spesifikasi desain, maka penelitian dilanjutkan ke tahap analisis untuk menginterpretasikan data dan menyusun kesimpulan. Namun, apabila hasilnya tidak sesuai, peneliti dapat kembali pada tahap pengujian untuk melakukan perbaikan dan pengulangan proses. Penelitian ini disusun sebagai studi komparatif dengan empat kelompok perlakuan, yaitu sampel kontrol tanpa proses annealing serta tiga sampel yang dipanaskan pada 180 °C, 350 °C, dan 450 °C. Masing-masing kelompok diulang sebanyak tiga kali agar ketelitian statistik meningkat.



GAMBAR 2.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

2.2 Uji Ketahanan Isolasi

Pengujian tahanan isolasi transformator dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kebocoran listrik pada transformator [14]

menggunakan alat *insulation resistance tester*. Pengujian dilakukan terhadap dua jenis isolasi, yaitu isolasi antar bagian yang sama-sama bertegangan, serta isolasi antara bagian bertegangan dengan bagian tidak bertegangan (ground). Hasil pengujian nilai tahanan isolasi ditampilkan dalam Tabel 2.1 [15].

TABEL 2.1 DATA UJI KETAHANAN ISOLASI

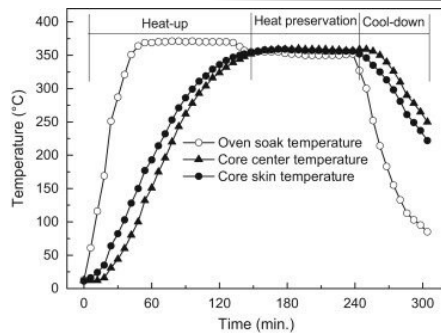
No	Tegangan Megger (kV)	Parameter	Keterangan
1	1	Primer-Ground	Tidak ada kebocoran arus dan tidak ada <i>discharge</i>
2	1	Sekunder-Ground	Tidak ada kebocoran arus dan tidak ada <i>discharge</i>
3	1	Primer- Sekunder	Tidak ada kebocoran arus dan tidak ada <i>discharge</i>

2.3 Uji Inti Transformator E-I

Pengukuran rugi inti AC mengikuti metode Epstein single-strip; tegangan eksitasi diatur sehingga rapat fluks 1 T tercapai pada frekuensi 50 Hz [16], sedangkan tegangan dan arus direkam simultan menggunakan WT 310E pada laju sampel 100 kS s⁻¹. Pada pengujian beban linier, bank resistor dihubungkan ke sisi sekunder hingga arus nominal ($I_{rated} = 2,1$ A) tercapai, lalu efisiensi dihitung menurut IEC 60076-1. Skenario penyearah memanfaatkan diode bridge VS-GBPC3508 dan kapasitor smoothing 2 mF; bentuk gelombang dianalisis dengan FFT 1 024-titik untuk memperoleh THD. Sementara itu, skema inverter menggunakan rangkaian full-bridge MOSFET 20 kHz dengan duty cycle 0,4 dan 0,8 guna menyerupai operasi UPS line-interactive [3], suhu permukaan inti dipantau agar tidak melampaui 90 °C sebagai batas aman vernis.

2.4 Proses Pemanasan Inti (Annealing)

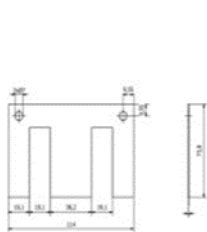
Proses annealing dijalankan dengan laju pemanasan konstan 5 °C menit⁻¹ sampai suhu target tercapai, diikuti penahanan suhu selama 60 menit. Selanjutnya, inti didinginkan secara alami di dalam furnace tertutup hingga temperatur turun ke 80 °C sebelum diekspos ke udara terbuka, mengacu pada ASTM A912-20 § 5.2. Pendinginan cepat sengaja dihindari guna mencegah distorsi plastis dan retakan mikro pada laminasi dikarenakan penurunan permeabilitas akibat *quenching* mendadak [17]. Gambar 2.2 menunjukkan profil temperatur selama proses perlakuan panas (annealing) pada inti transformator, yang dibagi ke dalam tiga tahap: *heat-up*, *heat preservation*, dan *cool-down*. Grafik ini merepresentasikan pentingnya kontrol temperatur yang tepat untuk memastikan distribusi panas merata di seluruh bagian inti selama annealing, demi mencegah tegangan sisa dan memastikan kualitas magnetik yang optimal. Semua variabel respons yaitu rugi inti, efisiensi, dan regulasi tegangan diperiksa normalitasnya melalui uji Shapiro–Wilk ($\alpha = 0,05$), kemudian dibandingkan menggunakan uji t berpasangan antara kontrol dan setiap perlakuan, sedangkan pengaruh suhu secara keseluruhan dianalisis dengan ANOVA satu arah. Instrumen dikalibrasi menurut standar ketertelusuran SNI ISO/IEC 17025-2017 di Laboratorium Instrumentasi PNB-Listrik, dan ketidakpastian total dihitung memakai metode root-sum-square berpedoman pada BIPM GUM 1995.



GAMBAR 2.2 PROSES ANNEALLING PADA TRAF0

2.5 Desain Transformator Inti EI

Transformator satu fasa inti E-I berdaya 500 VA yang dijadikan objek penelitian dilaminasi dari baja listrik Cold-Rolled Grain-Oriented (CRGO) Hi-B, Nippon Steel grade 23CG140, dengan kemurnian $\geq 99,5\%$ Fe dan $3,2\%$ Si; lembaran laminasi dipotong $50\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ mengikuti IEC 60404-8-7 seperti pada Gambar 2.3. Gulungan primer dan sekunder menggunakan kawat tembaga beremail Elektrisola Class H, AWG 24, dengan kemurnian Cu $\geq 99,99\%$ dan lapisan poliimid bebas halogen (RoHS). Seluruh rangkaian kemudian direndam pennis isolasi Varnish Dolph 670H berbasis poliester-imid (kadar padatan $45 \pm 2\%$) yang divalidasi untuk suhu operasi kontinu 180°C . Selama tahap pendinginan awal, tegangan sisa diminimalkan dengan aliran gas argon Ultra-High Purity (UHP) 99,999 % Samator pada debit 5 L min^{-1} . Proses annealing dilakukan menggunakan Electric Furnace Carbolite GCF 11/23 berkapasitas 11 L, suhu maksimum 1200°C , dan kendali PID dua zona ($\Delta T \pm 1^\circ\text{C}$). Karakterisasi impedansi inti dilaksanakan memakai LCR Meter Keysight E4980A ($20\text{ Hz} - 2\text{ MHz}$, akurasi $0,05\%$) pada 100 Hz dan 1 kHz guna mensimulasikan frekuensi operasi. Pengukuran rugi daya beban AC memanfaatkan Power Analyzer Yokogawa WT 310E ($0,1\%$ rdg $\pm 0,05\%$ rng) dengan bank resistor nikelin Mangores $0,5\ \Omega - 10\ \Omega$ sebagai beban linier (Gambar 3). Beban non-linier disimulasikan menggunakan penyearah jembatan Vishay VS-GBPC3508 (800 V , 35 A) dan inverter PWM prototipe 1 kW berbasis Infineon IPW60R099. Sumber tegangan uji mencakup Variac Matsunaga TDGC2-2 kVA ($0 - 260\text{ V AC}$) serta DC Power Supply TDK-Lambda GENH 750-5 ($0 - 150\text{ V}$ / 5 A) untuk prategangan DC. Gradien suhu pasca-annealing dipantau dengan termokopel tipe K Omega 5SRTC ($\pm 1^\circ\text{C}$) yang terhubung ke Data Logger National Instruments NI 9213, 16-kanal, guna memastikan akurasi pencatatan termal.



GAMBAR 2.3 INTI TRAF0 BENTUK E

2.6 Penentuan Efisiensi dan Regulasi Trafo EI

Kualitas suatu transformator dapat dinilai dari batas kenaikan suhu serta kemampuan pengaturan tegangannya yang masih berada dalam ambang batas yang diizinkan. Penilaian ini dilakukan dengan tetap mempertimbangkan efisiensi desain, yakni meminimalkan ukuran dan berat transformator tanpa

mengorbankan kinerja termal maupun regulasi tegangan [18]. Dalam analisis ini, kapasitansi terdistribusi pada sisi sekunder diasumsikan dapat diabaikan, mengingat tegangan dan frekuensi operasi pada sisi tersebut relatif rendah. Selain itu, geometri belitan dirancang sedemikian rupa untuk meminimalkan induktansi bocor hingga mencapai tingkat yang cukup rendah, sehingga pada sebagian besar kondisi operasi, pengaruhnya dapat diabaikan. Nilai regulasi tegangan transformator dapat dinyatakan dengan Persamaan (2-1).

$$\alpha = \frac{V_{\theta(N.L.)} - V_{\theta(F.L.)}}{V_{\theta(F.L.)}} \times 100\% \quad (2-1)$$

Keterangan:

α = Regulasi (%)

$V_{\theta(N.L.)}$ = Tegangan keluaran tan pa beban (V)

$V_{\theta(F.L.)}$ = Tegangan keluaran beban penuh (V)

Efisiensi menggambarkan tingkat kinerja suatu peralatan, dalam hal ini transformator, dalam mengonversi daya listrik dari sisi masukan ke sisi keluaran. Efisiensi ini dinyatakan sebagai perbandingan antara daya keluaran terhadap daya masukan, yang dirumuskan dengan Persamaan (2-2)

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100[\%] \text{ atau } \eta = \frac{P_o}{P_o + \sum \text{rugi} - \text{rugi}} \times 100[\%] \quad (2-2)$$

Keterangan:

η = Efisiensi (%)

P_o = Tegangan keluaran (V)

P_i = Tegangan masukan (V)

$\sum \text{rugi} - \text{rugi}$ = Rugi besi + rugi tembaga.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Uji Pembebanan Trafo Menggunakan Beban Linear

Uji Pembebanan ini pembebanan menggunakan kawat nikelin ukuran 2 mm^2 dengan tahanan $0,85\ \Omega$ bertujuan untuk mengetahui nilai efesiensi dan regulasi tegangan dilakukan dengan perbandingan antara rating output (keluaran) terhadap input (masukan) transformator yang ideal memiliki efesiensi 100% yaitu transformator yang tidak kehilangan daya sama sekali. Hasil uji pembebanan trafo 1 dapat dilihat di Tabel 3.1 yang menunjukkan bahwa regulasi tegangan cenderung stagnan sekitar 98%. Sedangkan efisiensi trafo sempat mengalami penurunan sebesar 79%. Hasil uji pembebanan trafo 2 dapat dilihat di Tabel 3.2 yang menunjukkan bahwa regulasi tegangan cenderung stagnan sekitar 98%. Sedangkan efisiensi trafo sempat mengalami penurunan sebesar 80%. Hasil uji pembebanan trafo 3 dapat dilihat di Tabel 3.3 menunjukkan bahwa regulasi tegangan cenderung stagnan sekitar 98%. Sedangkan efisiensi trafo sempat mengalami penurunan sebesar 74%. Proses pengujian dilakukan dengan cara menguji beban transformator menggunakan beban Non linear kawat nikelin. Pada setiap transformator memiliki rapat fluks yang berbeda-beda dengan transformator lainnya. Ketika sudah dilakukan perhitungan efesiensi dan regulasi tegangan, maka didapatkan hasil nilai efesiensi transformator dan regulasi transformator tegangan seperti pada Gambar 3.1.

TABEL 3.1 DATA PEMBEBANAN TRAF0 1 MENGGUNAKAN KAWAT NIKELIN

Uji Pembebanan Trafo 1 Menggunakan Kawat Nikelin									
V_p (V)	I_p (A)	V_s (V)	I_s (A)	P_p (W)	P_s (W)	PF p	PFs	Efesiensi Trafo (%)	Regulasi Tegangan
220	0.4	5.86	9.8	59.0	56.85	0.67	0.99	96.43	98.34
220	0.6	5.81	14.3	93.7	82.25	0.71	0.99	87.76	98.36

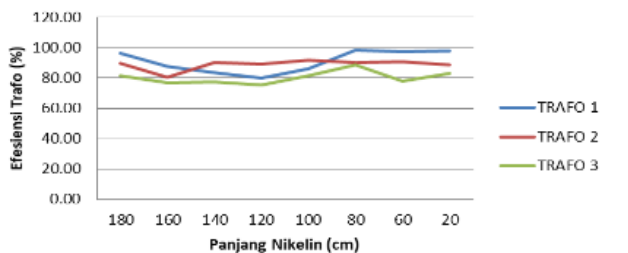
220	0.9	5.78	20.7	156.4	140.45	0.79	0.99	83.40	98.37
220	1	5.62	25.9	180.4	144.10	0.82	0.99	79.88	98.45
220	1.04	5.58	31.3	201.3	172.91	0.88	0.99	85.88	98.46
220	1.09	5.52	39.7	220.6	216.95	0.92	0.99	98.34	98.49
220	1.1	5.37	42.2	229.9	224.35	0.95	0.99	97.58	98.56
220	1.3	5.29	51.2	274.6	268.14	0.96	0.99	97.66	98.60

TABEL 3.2 DATA PEMBEBANAN TRAF0 2 MENGGUNAKAN KAWAT NIKELIN

Uji Pembebanan Trafo 2 Menggunakan Kawat Nikelin									
Vp (v)	Ip (A)	Vs (v)	Is (A)	Pp (W)	Ps (W)	PF p	PFs	Efesiensi Trafo (%)	Regulasi Tegangan
220	0.7	5.91	11.7	88.0	78.95	0.55	0.99	89.76	98.31
220	0.9	5.83	18.9	135.6	109.09	0.71	0.99	80.46	98.35
220	0.9	5.78	27.4	173.8	156.79	0.79	0.99	90.21	98.37
220	1.06	5.71	32.8	207.5	185.42	0.89	0.99	89.34	98.40
220	1.09	5.65	34.2	209.1	191.30	0.88	0.99	91.49	98.43
220	1.3	5.59	42.9	263.1	237.41	0.92	0.99	90.23	98.46
220	1.5	5.52	50.4	302.9	275.43	0.93	0.99	90.93	98.49
220	1.8	5.31	61.5	372.24	329.76	0.94	0.99	88.59	98.59

TABEL 3.3 DATA PEMBEBANAN TRAF0 3 MENGGUNAKAN KAWAT NIKELIN

Uji Pembebanan Trafo 3 Menggunakan Kawat Nikelin									
Vp (v)	Ip (A)	Vs (v)	Is (A)	Pp (W)	Ps (W)	PF p	PFs	Efesiensi Trafo (%)	Regulasi Tegangan
220	0.8	5.99	12.2	90.3	73.56	0.51	0.99	81.43	98.28
220	1	5.87	20.7	156.2	120.29	0.71	0.99	77.02	98.33
220	1.03	5.81	24.1	179.0	138.62	0.79	0.99	77.44	98.36
220	1.09	5.78	27.4	208.6	156.79	0.87	0.99	75.15	98.37
220	1.1	5.67	30.9	213.0	173.45	0.88	0.99	81.45	98.42
220	1.3	5.58	42.2	263.1	233.12	0.92	0.99	88.60	98.46
220	1.6	5.46	46.1	320.3	249.19	0.91	0.99	77.79	98.52
220	1.8	5.37	61.8	350.4	290.73	0.94	0.99	82.96	98.56



GAMBAR 3.1 GRAFIK EFISIENSI TRAF0

3.2 Uji Pembebanan Trafo Menggunakan Beban Kawat Nikelin dan Kiprok

Proses pengujian ini dilakukan dengan cara menguji beban Transformator menggunakan beban Non linier kawat nikelin ukuran 2 mm² dengan tahanan 0,85 ohm dan penambahan kiprok spesifikasi 100 A daya 1600 VA. Efisiensi transformator merupakan perbandingan daya keluaran output dan daya masukan input dimana besar kecilnya efisiensi pada transformator dipengaruhi besar kecilnya pembebanan dan regulasi tegangan suatu pengaturan transformator. Hasil uji pembebanan trafo 1 menggunakan beban kawat nikelin dan kiprok dapat dilihat di Tabel 3.4. Hasil uji pembebanan trafo 2 menggunakan beban kawat nikelin dan kiprok dapat dilihat di Tabel 3.5. Hasil uji pembebanan trafo 3 menggunakan beban kawat nikelin dan kiprok dapat dilihat di Tabel 3.6.

TABEL 3.4 DATA PEMBEBANAN TRAF0 1 MENGGUNAKAN KAWAT NIKELIN DAN KIPROK

Pembebanan Trafo 1 Menggunakan Kiprok											
Vp (V)	Ip (A)	Vs (V)	Is (A)	V (DC)	I (DC)	Pp (W)	Ps (W)	P (DC)	PFp	PFs	Efesiensi Trafo (%)
220	0.57	5.93	28.6	3.52	11.15	116.62	152.31	39.25	0.55	0.62	76.57
220	0.61	5.88	30.1	3.34	14.73	126.15	166.37	49.20	0.71	0.64	75.82
220	0.69	5.83	33.8	3.21	17.96	144.21	187.20	57.65	0.79	0.74	77.03
220	0.74	5.71	42.7	3.61	24.54	154.66	231.63	88.59	0.89	0.81	66.77
220	0.77	5.49	45.2	2.54	32.87	160.93	235.74	83.49	0.88	0.88	68.27
220	0.74	5.26	50.9	2.39	39.43	153.03	251.67	94.24	0.92	0.91	60.81
220	0.73	5.16	55.3	2.18	40.35	150.96	268.23	87.96	0.93	0.93	56.28
220	0.72	5.09	60.7	2.6	46.3	155.23	302.78	120.3	0.94	0.93	51.27

TABEL 3.5 DATA PEMBEBANAN TRAF0 2 MENGGUNAKAN KAWAT NIKELIN DAN KIPROK

Pembebanan Trafo 2 Menggunakan Kiprok											
Vp (v)	Ip (A)	Vs (v)	Is (A)	V (DC)	I (DC)	Pp (W)	Ps (W)	P (DC)	PF p	PFs	Efesiensi Trafo (%)
220	0.83	6.05	30.05	3.76	12.75	142.24	125.31	47.94	0.78	0.69	87.98
220	0.89	5.91	36.12	3.39	15.34	156.64	153.70	52.00	0.8	0.72	98.12
220	0.95	5.83	36.21	3.27	18.98	169.29	162.55	62.06	0.81	0.77	96.02
220	1.16	5.71	42.45	3.11	22.31	211.82	193.92	69.38	0.83	0.8	91.55
220	1.28	5.65	48.29	3.01	29.18	233.73	219.57	87.83	0.83	0.83	93.94
220	1.37	5.46	54.87	2.89	35.71	265.23	235.51	103.20	0.88	0.88	88.79
220	1.58	5.18	59.15	2.67	40.13	312.84	241.26	107.15	0.9	0.91	77.12
220	1.79	5.03	61.5	2.55	43.06	350.67	242.78	109.8	0.96	0.95	69.23

TABEL 3.6 DATA PEMBEBANAN TRAF0 3 MENGGUNAKAN KAWAT NIKELIN DAN KIPROK

Pembebanan Trafo 3 Menggunakan Kiprok											
Vp (V)	Ip (A)	Vs (V)	Is (A)	V (DC)	I (DC)	Pp (W)	Ps (W)	P (DC)	PFp	PFs	efesiensi (%)
220	0.89	5.83	36.5	3.52	17.2	160.56	138.32	60.54	0.82	0.65	86.15
220	0.92	5.79	39.98	3.44	20.12	178.11	159.72	69.21	0.88	0.69	89.68
220	0.98	5.71	43.12	3.39	23.81	189.73	172.35	80.72	0.88	0.7	90.84
220	1.23	5.69	49.42	3.35	28.12	246.25	205.28	94.20	0.91	0.73	83.36
220	1.34	5.48	51.32	3.27	30.12	277.11	205.30	98.49	0.94	0.73	74.09
220	1.43	5.37	56.27	3.18	31.64	298.87	251.23	100.62	0.95	0.79	84.06
220	1.67	5.31	59.21	3.11	35.45	356.38	268.35	110.25	0.97	0.84	75.30
220	1.84	4.89	60.15	3.05	38.16	392.66	291.14	116.39	0.97	0.88	74.22

3.3 Uji Karakteristik Trafo EI Aplikasi Inverter

Pada pengujian karakteristik transformator EI aplikasi inverter, pada sisi primer dipasang dengan inverter dan pada sisi sekunder diberi beban resistif menggunakan kawat nikelin. Hasil uji pembebanan trafo 1 menggunakan beban inverter dapat dilihat di Tabel 3.7. Hasil uji pembebanan trafo 2 menggunakan beban inverter dapat dilihat di Tabel 3.8. Hasil uji pembebanan trafo 3 menggunakan beban inverter dapat dilihat di Tabel 3.9. Gambar 3.2 menunjukkan grafik efisiensi transformator (Transformator 1, 2, dan 3) dengan beban inverter.

TABEL 3.7 DATA UJI KARAKTERISTIK TRAF0 EI 1 APLIKASI INVERTER

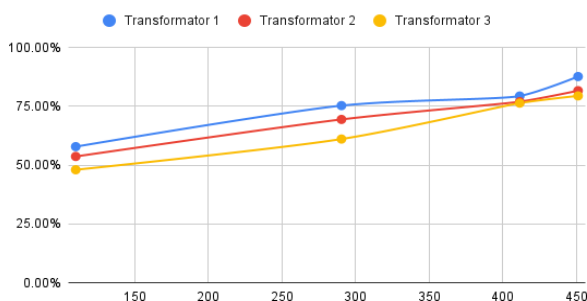
Uji Pembebanan Inverter Transformator 1						
Vp (V)	Ip (A)	Vs (V)	Is (A)	Pp (Watt)	Ps (Watt)	η (%)
6.79	28	220	0.5	190.12	110	57.86%
6.65	58	220	1.32	385.7	290.4	75.29%
6.4	81	220	1.87	518.4	411.4	79.36%
6.2	83	220	2.05	514.6	451	87.64%

TABEL 3.8 DATA UJI KARAKTERISTIK TRAF0 E1 2 APLIKASI INVERTER

Uji Pembebanan Inverter Transformator 2						
Vp (V)	Ip (A)	Vs (V)	Is (A)	Pp (Watt)	Ps (Watt)	η (%)
6.83	30	220	0.5	204.9	110	53.68%
6.64	63	220	1.32	418.32	290.4	69.42%
6.6	81	220	1.87	534.6	411.4	76.95%
6.5	85	220	2.05	552.5	451	81.63%

TABEL 3.9 DATA UJI KARAKTERISTIK TRAF0 E1 3 APLIKASI INVERTER

Uji Pembebanan Beban Resistif Inverter Transformator 3						
Vp (V)	Ip (A)	Vs (V)	Is (A)	Pp (Watt)	Ps (Watt)	η (%)
6.94	33	220	0.5	229.02	110	48.03%
6.89	69	220	1.32	475.41	290.4	61.08%
6.82	79	220	1.87	538.78	411.4	76.36%
6.76	84	220	2.05	567.84	451	79.42%

**GAMBAR 3.2 GRAFIK EFISIENSI DENGAN BEBAN INVERTER**

3.4 Pengaruh Proses Annealing

Pada penelitian ini, dilakukan variasi suhu dalam proses pemanasan (annealing) untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap rugi-rugi inti pada transformator daya. Material inti yang digunakan adalah baja silikon, yang dikenai tiga perlakuan suhu berbeda dalam proses annealing. Selain itu, satu transformator tanpa proses annealing digunakan sebagai variabel kontrol. Tujuan dari variasi ini adalah untuk mengidentifikasi pengaruh perlakuan termal terhadap efisiensi magnetik inti. Hasil lengkap dari pengujian disajikan pada Tabel 3.10.

TABEL 3.10 PROSES ANNEALLING

No.	Unit	Suhu proses annealing (°C)	Rugi-rugi inti (W)
1	TR1	Tanpa annealing	150,3
2	TR2	180	148,2
3	TR3	350	110,6
4	TR4	450	137,1

Berdasarkan data pada Tabel 3.10, dapat disimpulkan bahwa proses annealing memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan performa transformator, khususnya dalam mengurangi rugi-rugi inti. Dalam penelitian ini, proses annealing dilakukan dengan mempertahankan suhu target selama 60 menit, diikuti oleh proses pendinginan alami di dalam ruang (chamber) yang tetap tertutup. Hasil ini mendukung hipotesis awal bahwa tegangan internal (stress) pada struktur logam inti dapat diminimalkan melalui perlakuan termal, sehingga meningkatkan efisiensi magnetik inti transformator. Aspek penting lain yang perlu dicatat dari hasil penelitian ini adalah bahwa pada rentang suhu di

bawah 350°C, setiap peningkatan suhu selama proses annealing memberikan dampak penurunan rugi inti yang cukup signifikan. Namun demikian, pada suhu 180°C, penurunan nilai rugi inti relatif tidak berarti, sehingga dapat disimpulkan bahwa proses annealing pada suhu di bawah 200°C tidak memberikan efisiensi yang memadai dalam menurunkan rugi inti. Sebaliknya, pada suhu di atas 400°C, memang terjadi penurunan rugi inti dibandingkan dengan transformator tanpa proses annealing (variabel kontrol), namun performa yang dicapai masih lebih rendah dibandingkan pada suhu 350°C. Di samping itu, dari sisi konsumsi energi, proses annealing pada suhu di atas 400°C membutuhkan bahan bakar dalam jumlah besar, sehingga dianggap tidak efisien secara ekonomis. Oleh karena itu, suhu di atas 400°C tidak direkomendasikan untuk proses annealing karena konsumsi bahan bakar yang tinggi tidak sebanding dengan peningkatan performa yang diperoleh.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menelaah pengaruh variasi suhu proses annealing bersuhu menengah (180 °C, 350 °C, dan 450 °C) terhadap rugi-rugi inti, efisiensi, dan regulasi tegangan transformator satu fasa tipe E-I berdaya 500 VA. Topik ini penting karena transformator masih menyumbang porsi signifikan terhadap konsumsi energi sistem kelistrikan; peningkatan efisiensi di tingkat komponen akan berdampak langsung pada penghematan energi nasional dan peningkatan keandalan peralatan elektronik daya. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa perlakuan annealing pada suhu 350 °C selama 60 menit merupakan kondisi optimum: rugi inti menurun dari 150,3 W (kontrol) menjadi 110,6 W (-26 %), efisiensi beban linier mencapai 97 – 98 %, dan regulasi tegangan tetap stabil (~98 %). Sebaliknya, annealing pada 180 °C hanya menghasilkan penurunan rugi inti marginal, sedangkan perlakuan 450 °C cenderung meningkatkan rugi inti kembali serta memperburuk stabilitas termal, menandakan adanya titik balik dimana pertumbuhan butir dan stress termal mulai bersifat merugikan. Hasil ini sejalan dengan beberapa penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Du et al. (2017) dan Zhang et al. (2019), yang menunjukkan bahwa proses annealing mampu memperbaiki orientasi butir dan menurunkan tegangan sisa, sehingga menurunkan rugi inti. Namun, berbeda dari beberapa studi yang menggunakan suhu sangat tinggi (>600 °C), penelitian ini menunjukkan bahwa suhu menengah pun dapat memberikan hasil optimal bila dikontrol dengan durasi dan metode pendinginan yang sesuai. Dengan demikian, temuan ini memberikan alternatif pendekatan yang lebih ekonomis dan aplikatif untuk industri kecil. Pengembangan penelitian di masa mendatang dapat diarahkan pada (1) studi durasi annealing variabel untuk mengidentifikasi waktu proses minimum dengan hasil setara; (2) eksplorasi laju pendinginan terkontrol guna meminimalkan tegangan termal; (3) penerapan metode in-situ monitoring kerugian magnetik selama proses annealing; dan (4) pengujian pada laminasi baja listrik non-oriented ataupun amorf agar temuan dapat digeneralisasi ke material inti transformator generasi berikutnya. Dengan demikian, penelitian lanjutan diharapkan mampu menyusun pedoman proses yang lebih komprehensif bagi industri transformator skala UMKM maupun manufaktur berskala besar.

Referensi

- [1] B. Mitra, A. Singhal, S. Kundu, and J. P. Ogle, "Analyzing Distribution Transformer Degradation with Increased Power Electronic Loads," *2023 IEEE Power Energy Soc. Innov. Smart Grid Technol. Conf. ISGT 2023*, Oct. 2022, doi: 10.1109/ISGT51731.2023.10066387.
- [2] M. Haziq Mohd Wazir *et al.*, "Harmonics Assessment of Distribution Transformer with Photovoltaic Integration and Unbalanced Loads," *Elektr. J. Electr. Eng.*, vol. 23, no. 1, pp. 81–87, Apr. 2024, doi: 10.11113/ELEKTRIKA.V23N1.504.
- [3] M. A. Muzar, Syahrizal, and M. Syukri, "Analisis Pengaruh Suhu Akibat Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Daya Di Gardu Induk Lambaro," *J. Komputer, Inf. Teknol. dan Elektro*, vol. 3, no. 2, pp. 1–8, Jun. 2018, Accessed: Jul. 23, 2025. [Online]. Available: <https://jurnal.usk.ac.id/kitektro/article/view/10997>
- [4] P. Osinski and P. Witczak, "Analysis of Core Losses in Transformer Working at Static Var Compensator," *Energies* 2023, Vol. 16, Page 4584, vol. 16, no. 12, p. 4584, Jun. 2023, doi: 10.3390/EN16124584.
- [5] X. Ma, R. Jia, C. Liang, H. Du, X. Dong, and M. Ding, "Study of Transformer Harmonic Loss Characteristic in Distribution Network Based on Field-Circuit Coupling Method," *Sustain.* 2022, Vol. 14, Page 12975, vol. 14, no. 20, p. 12975, Oct. 2022, doi: 10.3390/SU142012975.
- [6] I. Ziger, B. Trkulja, and Z. Stih, "Determination of Core Losses in Open-Core Power Voltage Transformers," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 29426–29435, May 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2838446.
- [7] G. A. Widyaningsih, "Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional," *J. Huk. Lingkung. Indones.*, vol. 4, no. 1, pp. 139–152, Dec. 2017, doi: 10.38011/JHLI.V4I1.53.
- [8] Y.-T.; Jou *et al.*, "A Systematic Model to Improve Productivity in a Transformer Manufacturing Company: A Simulation Case Study," *Appl. Sci.* 2024, Vol. 14, Page 519, vol. 14, no. 2, p. 519, Jan. 2024, doi: 10.3390/APP14020519.
- [9] Z. Zhang *et al.*, "Effects of Annealing Temperature and Compaction Pressure on Magnetic Properties of Fe–Si Powder Cores Fabricated by an Improved Bluing Method," *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 31, no. 5, pp. 1507–1513, May 2018, doi: 10.1007/S10948-017-4358-0/METRICS.
- [10] Y. Du, W. Zheng, and J. Zhang, "Modeling and Analysis of Leakage Flux and Iron Loss Inside Silicon Steel Laminations," *Int. J. Energy Power Eng.* 2016, Vol. 5, Page 48, vol. 5, no. 1, pp. 48–52, Nov. 2015, doi: 10.11648/J.IJEPE.S.2016050101.17.
- [11] P. Kühn, Y. Yang, G. Chen, S. N. Foster, H. Egger, and B.-X. Xu, "Multiphysics simulations of microstructure influence on hysteresis and eddy current losses of electrical steel," Feb. 2025, Accessed: Jul. 23, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2502.01559v1>
- [12] C. Zhou, S. Luan, J. Qiao, and H. Wang, "Effect of Normalizing Temperature on Microstructure, Texture and Magnetic Properties of Non-Oriented Silicon Steel," *Met.* 2025, Vol. 15, Page 217, vol. 15, no. 2, p. 217, Feb. 2025, doi: 10.3390/MET15020217.
- [13] J. Yuan *et al.*, "Effect of annealing time on microstructure and properties of high-strength non-oriented silicon steel with Nb addition," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 36, pp. 3756–3772, May 2025, doi: 10.1016/J.JMRT.2025.04.056.
- [14] A. Ashari, "Sistem Penempatan Transformator Distribusi Berdasarkan Jatuh Tegangan (Studi Kasus Pada PT. PLN (Persero) APJ Banyuwangi)," *CYCLOTRON*, vol. 1, no. 2, Aug. 2018, doi: 10.30651/CL.V1I2.1807.
- [15] Jamaaluddin, I. Robandi, and I. Anshory, "A very short-term load forecasting in time of peak loads using interval type-2 fuzzy inference system: A case study on java bali electrical system," *J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 464–478, 2019, Accessed: Jul. 23, 2025. [Online]. Available: <https://scholar.its.ac.id/en/publications/a-very-short-term-load-forecasting-in-time-of-peak-loads-using-in>
- [16] M. T. Afif, I. Ayu, and P. Pratiwi, "Analisis Perbandingan Baterai Lithium-Ion, Lithium-Polymer, Lead Acid Dan Nickel-Metal Hydride Pada Penggunaan Mobil Listrik - Review," *J. Rekayasa Mesin Univ. Brawijaya*, vol. 6, no. 2, p. 129467, Aug. 2015, doi: 10.21776/UB.JRM.2015.006.02.1.
- [17] A. A. Feshchenko, N. A. Kulesh, E. A. Mikhailitsina, D. S. Neznakhin, N. V. Selezneva, and E. A. Stepanova, "Magnetic Properties of Rapidly Quenched Soft Magnetic Co-Based Alloy Subjected to Heat Treatment in a Sulfur Atmosphere," *Phys. Met. Metallogr.*, vol. 122, no. 1, pp. 1–5, Jan. 2021, doi: 10.1134/S0031918X21010038/METRICS.
- [18] M. Kong, L. Bu, and W. Wang, "Investigations on the discharge/charge process of a novel AgCl/Ag/carbon felt composite electrode used for seawater batteries," *J. Power Sources*, vol. 506, p. 230210, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2021.230210.