

# ANALISIS PENGARUH MAGNETISASI TERHADAP KEBISINGAN DAN EFISIENSI PADA TRANSFORMATOR INTI BESI CRGO DAN AMORPHOUS

Luqman Hakim<sup>1</sup>, Henra Sibatuara<sup>2</sup>, Tajuddin Nur<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Fakultas Ketenagalistrikan dan Terbarukan Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia

<sup>3</sup>Dept. Teknik Elektro Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jakarta, Indonesia

<sup>1</sup>luqman2310542@itpln.ac.id

<sup>2</sup>henra2310507@itpln.ac.id

<sup>3</sup>tans@atmajaya.ac.id

**Abstract**— Distribution transformers play a vital role in the reliability of electric power distribution systems. With technological advancements, transformers are now manufactured not only using silicon steel but also amorphous steel cores. However, field applications of amorphous steel distribution transformers have revealed anomalies in the form of excessive humming noise exceeding the SPLN D3.002-1:2020 standard. This noise has become a public concern and raises questions regarding the reliability of amorphous core transformers. This study experimentally investigates the magnetization characteristics of amorphous and CRGO (Cold Rolled Grain Oriented) steel cores by analyzing their magnetization curves. The results show that amorphous steel cores reach magnetic saturation more rapidly than CRGO cores. These findings are consistent with noise level measurements, which indicate that amorphous steel transformers generate higher noise levels compared to CRGO transformers.

**Keywords**— Distribution Transformer, Iron Core, CRGO, Amorphous, Magnetization Curve, Noise Level.

**Intisari**— Transformator distribusi memiliki peran penting dalam kelangsungan sistem jaringan distribusi tenaga listrik. Seiring dengan perkembangan teknologi, saat ini transformator distribusi tidak hanya di produksi menggunakan baja silikon saja, akan tetapi banyak produsen transformator yang sudah memproduksi menggunakan baja amorphous. Dalam aplikasi penerapan transformator baja amorphous dilapangan, ditemukan kondisi anomali dimana transformator tersebut berdengung melebihi ketentuan standar SPLN D3.002-1:2020. Dengung pada transformator baja amorphous menjadi keluhan masyarakat yang berada disekitar transformator baja amorphous sehingga keandalan transformator dengan inti besi amorphous diragukan. Dari kejadian tersebut penulis termotivasi untuk melakukan studi tentang karakteristik inti besi amorphous dan CRGO (Cold Rolled Grain Oriented) dengan metode eksperimen percobaan pengujian kurva magnetisasi terhadap kedua inti besi yang digunakan pada transformator distribusi untuk mengetahui karakteristik saturasi terhadap kedua inti tersebut. Hasil percobaan yang dilakukan menunjukkan bahwa kurva magnetik inti baja amorphous cenderung lebih cepat mengalami kejenuhan dibandingkan CRGO. Hal ini berbanding lurus dengan pengujian tingkat bising yang dilakukan dimana hasil pengujian menunjukkan transformator baja amorphous memiliki nilai kebisingan yang lebih tinggi daripada CRGO.

**Kata Kunci**— Transformator Distribusi, Inti Besi, CRGO, Amorphous, kurva magnetisasi, Tingkat Bising.

## I. PENDAHULUAN

Pengertian transformator menurut IEC (*Internasional Electornical Commision*) adalah “Peralatan diam yang terdiri dari dua atau lebih kumparan dengan induksi elektromagnetik bersama, yang mengubah sebuah sistem tegangan dan arus bolak-balik ke tegangan dan arus sistem lainnya, dan biasanya dengan nilai yang berbeda pada frekuensi yang sama untuk kebutuhan transmisi daya listrik”. [1]

Transformator atau yang lebih sering dikenal Trafo merupakan alat yang memiliki peran penting dalam sistem kelistrikan di Indonesia. Trafo berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari tegangan rendah ke tegangan tinggi (*Step Up*) atau dari tegangan tinggi ke tegangan rendah (*Step Down*) dalam frekuensi yang sama. Transformator adalah peralatan penting dengan biaya modal tinggi dalam sistem tenaga listrik. Penilaian kondisi transformator saat ini, pemantauan kondisi dilapangan dan keandalannya merupakan hal penting yang memerlukan studi menyeluruh. [2] Seiring dengan perkembangan teknologi, saat ini transformator distribusi tidak hanya di produksi menggunakan baja silikon saja, akan tetapi banyak produsen transformator yang sudah memproduksi menggunakan baja amorphous.

Transformator dengan baja amorphous dibuat menggunakan logam feromagnetik yang disusun menjadi lembaran tipis. Resistensi yang tinggi dan lembaran yang tipis telah terbukti menghasilkan rugi-rugi yang rendah dan ketahanan yang lebih baik terhadap gelombang harmonik. [3] Transformator baja amorphous memiliki keunggulan nilai rugi-rugi yang sangat rendah dibandingkan dengan baja silikon. Nilai rugi-rugi yang rendah pada transformator distribusi akan menurunkan nilai susut pada sistem jaringan distribusi PLN. Namun dalam aplikasi penerapan transformator baja amorphous dilapangan, ditemukan anomali bahwa transformator tersebut

mengeluarkan dengung yang tidak biasa bahkan nilai tingkat kebisingan pada beberapa transformator baja amorphous dilapangan melebihi ketentuan standar SPLN D3.002-1:2020.

Dengung pada transformator baja amorphous menimbulkan kecemasan dimasyarakat khususnya yang berada dekat dengan transformator. Dalam permasalahan yang terjadi penulis ingin mengetahui perbandingan karakteristik kurva magnetisasi antara inti besi CRGO dan Amorphous lebih dalam dan korelasi dengung yang terjadi pada transformator distribusi baja amorphous.

## II. LANDASAN TEORI

### A. Transformator

Transformator merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya/tenaga dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Transformator terdiri dari dua buah kumparan yaitu (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang mempunyai reluktansi (*reluctance*) rendah. [4]

Transformator atau yang lebih dikenal trafo adalah komponen elektomagnet yang dapat mengkonversi tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya dalam frekuensi yang sama. [4] Trafo Distribusi mempunyai peran yang sangat penting dalam penyaluran energi listrik ke konsumen. Kerusakan pada trafo distribusi dapat menyebabkan keandalan pelayanan terhadap konsumen dapat terganggu.

### B. Inti Transformator

Inti besi dibuat dari lempengan-lempengan feromagnetik tipis yang berguna untuk mempermudah jalan fluksi yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Inti besi ini juga diberi isolasi untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh arus eddy "*Eddy Current*". Inti transformator terdiri dari lapisan plat-plat baja silikon yang disusun sedemikian rupa sehingga membentuk batangan dengan ketebalan tertentu. Inti besi dibentuk dari laminasi baja silikon (*cold-rolled grain oriented*) atau baja amorphous (*amorphous steel*). Kontruksi inti besi dapat dibentuk dengan dua cara yaitu susunan (*stacking*) dan gulungan (*wound type*).

Transformator dengan baja amorphous dibuat menggunakan logam feromagnetik yang disusun menjadi lembaran tipis. Resistensi yang tinggi dan lembaran yang tipis telah terbukti menghasilkan rugi-rugi yang rendah dan ketahanan yang lebih baik terhadap gelombang harmonik. [3]

### C. Rugi-rugi Transformator

Rugi-rugi Transformator merupakan kerugian energi yang terjadi selama proses konversi daya listrik pada

transformator. Kerugian ini terjadi karena berbagai macam faktor yang ada dalam komponen transformator, baik pada bagian inti besi maupun lilitan. Rugi-rugi yang paling dominan pada transformator yaitu rugi-rugi inti dan rugi-rugi tembaga.

Rugi rugi inti disebabkan oleh adanya fenomena magnetisasi yang terbentuk di dalam inti transformator saat arus bolak balik melalui lilitan. Rugi-rugi inti terdiri dari rugi hysteresis (*Hysteresis Loss*) dan rugi arus eddy (*Eddy Current Loss*). Rugi hysteresis disebabkan oleh pergerakan domain magnetic dalam bahan inti sementara rugi arus eddy disebabkan oleh arus eddy yang terbentuk akibat perubahan fluks magnetik. Persamaan berikut dapat digunakan untuk menghitung rugi-rugi inti:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks} \cdot V \quad (1)$$

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_{maks}^2 \cdot t^2 \cdot V \quad (2)$$

### D. Kurva Magnetisasi

Kurva magnetisasi material inti transformator adalah grafik yang menunjukkan hubungan antara kuat medan magnet (H) atau arus magnetisasi (*Im*) dan rapat fluks magnet atau fluks per lilitan (*flux linkage*) pada suatu bahan magnetik. Untuk mendapatkan kurva tersebut, pengujian rugi rugi tanpa beban dilakukan dengan memberikan tegangan secara bertahap hingga melebihi tegangan nominalnya yang menyebabkan inti besi mengalami saturasi. Nilai arus, daya dan cosphi dicatat untuk setiap nilai tegangan yang diberikan. Selanjutnya, nilai-nilai tersebut digunakan untuk mendapatkan arus magnetisasi dan *flux linkage* serta arus rugi rugi berdasarkan persamaan berikut:

$$PF = \cos \theta = \frac{P_s}{V_s \cdot I_s} \quad (3)$$

$$I_m = I_s \cdot \sin \theta \quad (4)$$

$$I_c = I_s \cdot \cos \theta \quad (5)$$

$$L_m = \frac{V_s}{I_s \cdot 2\pi \cdot f} \quad (6)$$

$$\lambda = I_m \cdot L_m \quad (7)$$

Dimana :

$P_s$  : daya (W)

$V_s$  : tegangan sekunder (V)

$I_s$  : arus sekunder (A)

$I_c$  : arus rugi rugi (A)

$I_m$  : arus magnetisasi (A)

$L_m$  : Induktansi inti transformator (H)

$\lambda$  : *flux linkage* (Wb-T)

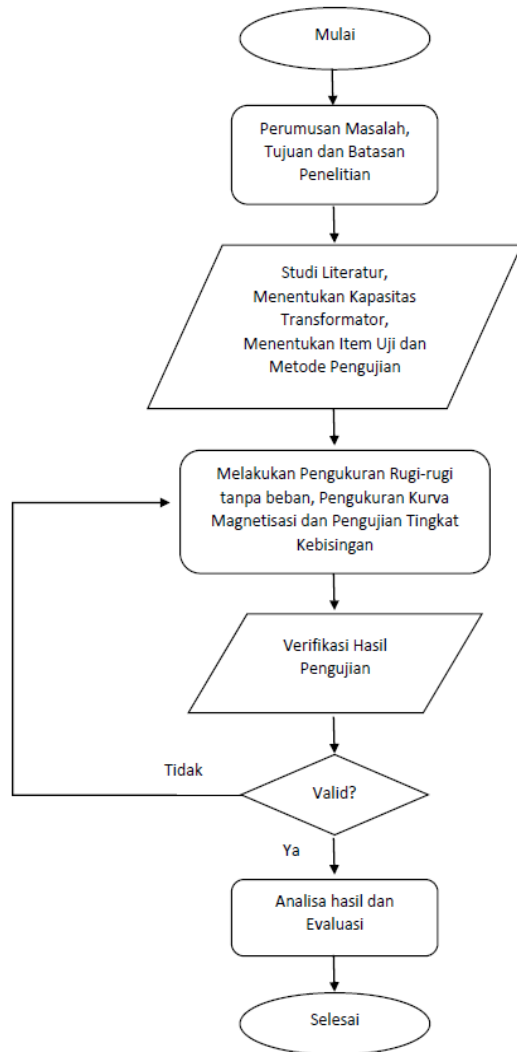
Perubahan medan magnet mempengaruhi struktur fisik inti besi. Perubahan signifikan pada fluks magnetik akan

meningkatkan getaran mekanis dan menghasilkan suara yang keras.

### III. METODE PENELITIAN

#### A. Tahapan Penelitian

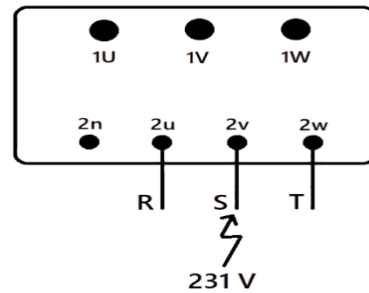
Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi literatur, pengambilan data atau pengujian, analisa data dan yang terakhir adalah evaluasi hasil dan kesimpulan. Untuk mempermudah dalam melakukan penelitian ini penulis membuat Diagram Alir (*Flowchart*) sebagai berikut:



Gambar 1. Diagram Alir

Penelitian ini dimulai dengan menyiapkan 2 unit transformator 3 fasa 50 kVA Yzn5 dengan inti besi CRGO dan baja amorphous. Pengujian rugi tanpa beban sesuai ketentuan IEC 60076-1:2011 subpasal 11.5 diaplikasikan untuk mendapatkan rugi-rugi histeresis dan arus eddy atau rugi-rugi inti. Pengujian dilakukan dengan menerapkan tegangan nominal pada sisi tegangan rendah dan sisi tegangan tinggi dibiarkan terbuka seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Untuk mendapatkan kurva magnetisasi pengujian rugi tanpa beban diaplikasikan namun tegangan

masukannya dinaikkan secara bertahap dengan kenaikan tegangan sebesar 10% tegangan nominal pada 5 titik pengukuran awal selanjutnya kenaikan tegangan 5% sampai 110% tegangan nominal.



Gambar 2. Wiring Pengujian Rugi-rugi Inti

Pengujian tingkat kebisingan dilakukan untuk mengetahui perbedaan nilai kebisingan antara transformator dengan inti CRGO dan amorphous. Pengujian dilakukan menggunakan rangkaian yang sama dengan rangkaian pengujian rugi tanpa beban. Pengukuran dilakukan pada 80%, 100% dan 110% tegangan nominal.

Data spesifikasi trafo distribusi yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel I  
Spesifikasi Transformator Distribusi

Spesifikasi	CRGO	Amorphous
Daya Pengenal	50 kVA	50 kVA
Jumlah Fasa	3	3
Frekuensi	50 Hz	50 Hz
Kelompok Vektor	Yzn5	Yzn5
Tegangan HV	20 kV	20 kV
Tegangan LV	400 V	400 V
Arus HV	1,443 A	1,443 A
Arus LV	72,168 A	72,168 A
Jenis Belitan HV - LV	Al-Al	Al-Al
Panjang Total	880 mm	1090 mm
Lebar Total	670 mm	710 mm
Tinggi permukaan radiasi (h)	740 mm	765 mm

### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

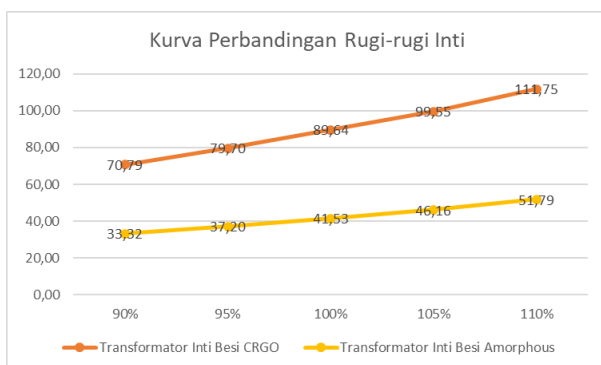
#### A. Hasil Pengujian Rugi-rugi Inti

Pengujian rugi tanpa beban dilakukan pada 90%, 95%, 100%, 105% dan 110% tegangan nominal terhadap transformator 50 kVA dengan inti CRGO dan baja amorphous. Tabel 4.1 merupakan hasil pengujian rugi tanpa beban dari kedua transformator.

Tabel II  
Hasil pengujian Rugi tanpa beban

$V_{target}$	Transformator Inti Besi CRGO		Transformator Inti Besi Amorphous	
	No Load		No Load	
	$P_0$	$I_0$	$P_0$	$I_0$
90%	70,79	0,135	33,32	0,210
95%	79,70	0,140	37,20	0,207
100%	89,64	0,149	41,53	0,197
105%	99,55	0,181	46,16	0,180
110%	111,75	0,252	51,79	0,158

Dari hasil pengujian rugi tanpa beban yang telah dilakukan, diketahui bahwa nilai rugi tanpa beban transformator dengan inti baja amorphous memiliki nilai yang lebih rendah daripada transformator dengan inti CRGO. Hal ini sesuai dengan salah satu kelebihan baja amorphous yang memiliki nilai rugi-rugi yang sangat rendah (*Low Losses*). Persentase perbandingan nilai rugi tanpa beban transformator distribusi dengan inti baja amorphous yaitu 53% lebih rendah dari CRGO, hal ini dapat dilihat pada kurva digambar 3. Perbandingan yang sangat signifikan terhadap rugi-rugi transformator distribusi ini dapat menjadi alternatif pilihan yang menguntungkan untuk mengurangi susut ketika transformator distribusi dengan baja amorphous diaplikasikan pada jaringan distribusi PLN.



Gambar 3. Kurva Perbandingan Rugi-rugi Inti

#### B. Pengujian Kurva Magnetisasi Inti

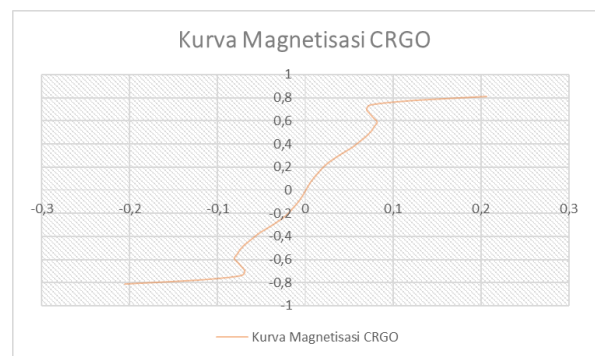
Kurva magnetisasi diperoleh dari pengukuran rugi tanpa beban dengan pengambilan titik ukur di beberapa persen tegangan nominal. Hasil pengukuran dihitung berdasarkan persamaan (3) s/d (7). Tabel III merupakan hasil perhitungan kurva magnetisasi pada transformator inti CRGO.

Hasil pengujian kurva magnetisasi transformator dengan inti CRGO ditunjukkan pada gambar 4, kurva tersebut menggambarkan hubungan antara arus magnetisasi dan *Flux Linkage* pada transformator inti CRGO memiliki bentuk kurva menyerupai huruf "S" yang tertutup, hal ini menunjukkan fenomena histeresis. Titik

dimana kurva memotong sumbu X menunjukkan nilai koersivitas, dalam hal ini terlihat nilai koersivitas mendekati 0 yang berarti bahwa material mudah mengalami demagnetisasi atau pelepasan medan magnet. Hal ini selaras dengan karakteristik inti CRGO.

Tabel III  
Hasil Pengujian Kurva Magnetisasi Transformator Inti CRGO

$V_{test}$ (V)		$I_m$ (A)	$X_m$	$L_m$ (A)	$\lambda$
254,12	...	0,206	1235,21	3,93	0,809
242,50	...	0,118	2061,49	6,57	0,772
...	...	...	...	...	...
46,14	...	0,014	3361,24	10,70	0,147
23,05	...	0,006	3980,52	12,68	0,073
0,00	...	0,000	0,00	0,00	0,000
-23,05	...	-0,006	3980,52	12,68	-0,073
-46,14	...	-0,014	3361,24	10,70	-0,147
...	...	...	...	...	...
-242,50	...	-0,118	2061,49	6,57	-0,772
-254,12	...	-0,206	1235,21	3,93	-0,809



Gambar 4. Kurva Magnetisasi CRGO

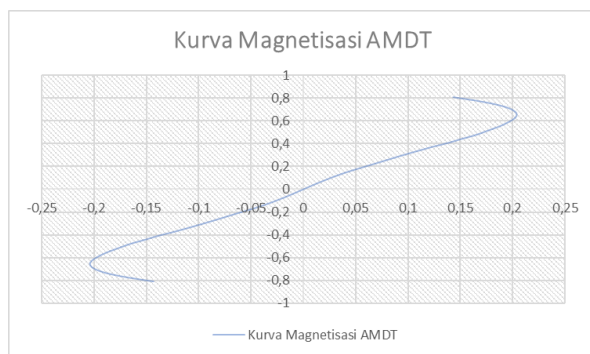
Titik dimana kurva memotong sumbu Y saat *flux linkage* ( $Wb \cdot T$ ) = 0 merupakan fenomena remanensi, yaitu sisa magnetisasi ketika arus magnetisasi dihilangkan. Sementara pada bagian akhir kurva menunjukkan bahwa material akan mencapai titik jenuh karena *flux linkage* tidak banyak terjadi peningkatan.

Tabel IV  
Hasil Pengujian Kurva Magnetisasi Transformator Inti Amorphous

$V_{test}$ (V)		$I_m$ (A)	$X_m$	$L_m$ (A)	$\lambda$
254,03	...	0,143	1776,97	5,66	0,809
242,35	...	0,169	1435,07	4,57	0,772
...	...	...	...	...	...
46,17	...	0,040	1149,62	3,66	0,147

Tabel IV  
Hasil Pengujian Kurva Magnetisasi Transformator Inti Amorphous

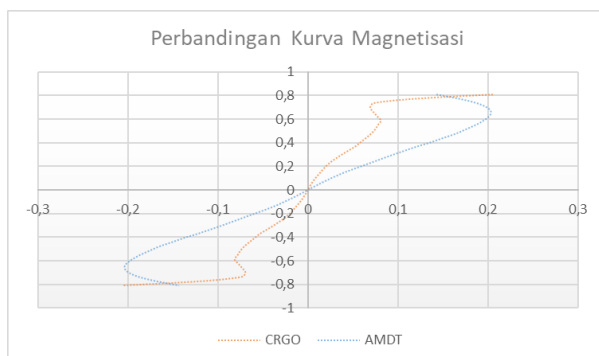
$V_{test} (V)$		$I_m (A)$	$X_m$	$L_m (A)$	$\lambda$
23,09	...	0,019	1237,22	3,94	0,074
0,00	...	0,000	0,00	0,00	0,000
-23,09	...	-0,019	1237,22	3,94	-0,074
-46,17	...	-0,040	1149,62	3,66	-0,147
...	...	...	...	...	...
-242,35	...	-0,169	1435,07	4,57	-0,772
-254,03	...	-0,143	1776,97	5,66	-0,809



Gambar 4. Kurva Magnetisasi Amorphous

Gambar 4. Menunjukkan kurva magnetisasi transformator dengan baja amorphous, kurva tersebut menunjukkan kurva yang relative lebih landai dengan gradient tinggi diawal magnetisasi. Nilai koersivitas pada amorphous juga berada mendekati nilai 0, hal ini terjadi karena pengukuran dilakukan pada kondisi *minor loop* atau pada material dengan sifat *soft magnetic* yang baik.

Transformator baja amorphous mencapai saturasi pada nilai arus magnetisasi yang lebih rendah. Pada akhir kurva, peningkatan arus magnetisasi tidak lagi menghasilkan peningkatan *fluk linkage* secara proporsional, bahkan menurun akibat perubahan domain magnet yang terganggu oleh stress mekanis internal. Hal ini karena struktur amorphous yang sangat tipis.



Gambar 5. Perbandingan Kurva Magnetisasi

Gambar 5 menunjukkan perbandingan kurva magnetisasi antara transformator dengan inti CRGO dan baja amorphous. CRGO memiliki kurva yang lebih tajam menuju titik jenuh namun diperlukan arus magnetisasi yang tinggi untuk mencapai fluks maksimum dan memiliki fluks yang stabil, sementara kurva magnetisasi baja amorphous menunjukkan kurva yang lebih halus dan mengindikasikan permeabilitas yang tinggi diawal, namun memiliki potensi fluks bocor yang tinggi ketika dialiri arus tinggi. Hal ini bias dilihat dari kurva yang melengkung ketika diberi tegangan tinggi. Baja amorphous mencapai saturasi pada nilai arus magnetisasi yang lebih rendah dibandingkan CRGO.

Permeabilitas awal yang tinggi pada transformator amorphous menjadikannya lebih cepat termagnetisasi dan cocok untuk mengurangi rugi-rugi inti pada beban ringan.

Fenomena kurva melengkung karena nilai arus magnetisasi menurun dianggap bukan saturasi klasik melainkan penurunan fluks efektif akibat efek termal, mekanis dan distribusi fluks yang berubah. Hal ini terjadi pada material baja amorphous karena struktur non-kristalnya lebih sensitif terhadap stress dan efek suhu panas dibandingkan CRGO.

### C. Pengujian Tingkat Bising (Noise)

Pengujian tingkat bising juga dilakukan untuk mengetahui perbandingan noise transformator distribusi inti CRGO dan baja amorphous. Pengujian dilakukan dengan rangkaian yang sama seperti rangkaian pengujian rugi tanpa beban dimana tegangan yang diterapkan sebesar 90%, 100% dan 110% dari tegangan nominal. Nilai tingkat bising diukur menggunakan sound level meter dan pengujian dilakukan sesuai IEC 60076-10:2016 subpasal 6.10.

Hasil pengujian tingkat bising yang dilakukan terhadap transformator distribusi inti CRGO dan Baja Amorphous terlampir pada tabel V.

Tabel V  
Hasil pengujian Rugi tanpa beban

No.	$V_{uji} (V)$	Tingkat Bising (dB)	
		CRGO	Amorphous
1	360	36,85	39,42
2	400	41,96	48,4
3	440	45,59	51,27

Noise pada transformator distribusi baja amorphous memiliki nilai lebih tinggi dibanding CRGO. Hal ini karena terjadi karena baja amorphous memiliki struktur non-kristalin yang membuatnya sangat tipis namun efisiensi magnetiknya tinggi sehingga memiliki losses yang rendah, akan tetapi koefisien magnetostriksi yang besar sehingga perilaku getarnya tidak teratur karena

butirannya tidak terorientasi. Hal ini menyebabkan noise akustik lebih tinggi, terutama saat mendekati saturasi.

Sementara transformator dengan inti CRGO memiliki orientasi butiran yang teratur dan koefisien magnetostriksi lebih rendah sehingga noisennya lebih kecil pada kondisi operasi yang sama.

Noise pada transformator berasal dari efek magnetostriksi, yaitu perubahan dimensi fisik material inti saat mengalami siklus magnetisasi. Semakin tinggi fluks, semakin besar perubahan dimensi inti akibat magnetostriksi sehingga noise menjadi tinggi.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian dan analisis pengaruh magnetisasi terhadap kebisingan dan efisiensi pada transformator inti besi CRGO dan amorphous yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Transformator distribusi 50 kVA Yzn5 dengan inti baja amorphous memiliki rugi-rugi inti yang rendah dan permeabilitas awal yang tinggi, akan tetapi transformator ini menghasilkan noise lebih tinggi dibanding transformator distribusi 50 kVA Yzn5 dengan inti CRGO, hal ini terjadi karena efek magnetostriksi yang lebih besar.
- Transformator distribusi 50 kVA Yzn5 dengan inti CRGO memiliki stabilitas fluks yang baik dan noise yang lebih rendah dari transformator distribusi baja amorphous pada kapasitas yang sama dan kondisi operasi yang sama.
- Kurva magnetisasi pada transformator distribusi baja amorphous tidak menunjukkan saturasi yang umum karena struktur non-kristalnya yang sensitive terhadap stress dan efek termal.
- Selain dipengaruhi oleh magnetostriksi tingkat kebisingan transformator juga dipengaruhi oleh kenaikan tegangan.
- Penelitian ini masih banyak kekurangan dan perlu penelitian lanjutan untuk memastikan efisiensi penggunaan transformator distribusi baja amorphous di jaringan distribusi PLN.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dosen Pembimbing, PLN Pusat Sertifikasi serta Kampus IT PLN yang telah memberi dukungan yang membantu pelaksanaan penelitian serta penulisan jurnal ini.

## REFERENSI

- [1] P. T.-P. I. G. E. 3.0. Patent IEC 60076-1, 2011.
- [2] R. S. H. T. M. S. K. Ibrahim, "Reliability calculations based on an enhanced transformer life," *Ain Shams Engineering Journal*, p. 1, 2022.
- [3] Teck Global, "Amorphous core distribution transformers," May 2017.
- [4] A. K. M. T. P. Muhammad Luqmanul Hakim, "PENGARUH OVER EKSITASI PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DI GARDU INDUK SERPONG TERHADAP PENUAAN ISOLASI KERTAS DITINJAU DARI SISI TERMAL," *Media Elekrika*, vol. Vol. 5, Juni 2012.
- [5] C. S. B. H. W. L. Y. S. K. X. E. Z. W. L. Wei Huang, "A restoration-clustering-decomposition learning framework for aging-related failure rate estimation of distribution transformers," *Reliability Engineering and System Safety*, 2023.
- [6] I. 60076-7, "Loading Guide For Oil-Immersed Power Transformer," Geneva, Switzerland, 2005
- [7] K. Ridwan, "Analisa Perkiraan Umur Transformator Distribusi Berdasarkan Pembebanan Dengan Metode Tingkat Tahunan," *Jurnal Fokus Elektroda*, vol. Volume 02 No 04, 2017.
- [8] N. W. P. B. S. M. A. P. P. K. M. T. H. Brian Bramantyo S.D.A. Harsono, "Evaluasi Penggunaan Transformator dengan Inti Amorphous pada Jaringan Distribusi di Indonesia," *PLN Research Institute*, 2019.
- [9] S. Abduh, *Teori Kegagalan Isolasi*, Jakarta: Universitas Trisakti, 2003.
- [10] I. F. L. M. I. M. P. M. Krestovel Alvian Kodoati, "Analisa Perkiraan Umur Transformator," *E-Journal Teknik Elektro dan Komputer*, 2015.
- [11] D. Marsudi, *Pembangkitan Energi Listrik*, Jakarta: Penerbit Erlangga, 2011.
- [12] B. L. Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi*, Jakarta: Erlangga, 2012.
- [13] I. N. O. e. a. Winanta, "Studi Tegangan Tembus Minyak Transformator," *Jurnal SPEKTRUM*, pp. 6, 10-18, 2019.
- [14] I. 60076-2, "Temperatur rise for liquid-immersed transformers," Geneva, Switzerland, 2011.