

Studi Pengaruh Pemilihan Rasio CT Terhadap Arus Hubung Singkat dan Potensi Saturasi pada Penyulang 20 kV Gardu Induk New Jakabaring

Yogi Sepatra Paulus^{1*}, Budi Sudiarto²

^{1,2} Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia

yogi.sepatra@ui.ac.id¹, budi.sudiarto@ui.ac.id²

Received 10 Juni 2025 | Revised 04 Juli 2025 | Accepted 16 Juli 2025

ABSTRAK

Sistem proteksi pada jaringan distribusi tegangan menengah sangat bergantung pada akurasi transformator arus (CT) dalam mendeteksi gangguan dan mengoperasikan relay proteksi. Saat terjadi gangguan hubung singkat, CT berpotensi mengalami saturasi magnetik yang menyebabkan representasi arus sekunder tidak akurat, sehingga mengganggu kinerja proteksi. Penelitian ini mengevaluasi karakteristik saturasi CT pada penyulang 20 kV dan mengidentifikasi konfigurasi rasio yang paling andal saat arus ekstrem. Metode yang digunakan menggabungkan pengujian lapangan di GI 150 kV New Jakabaring dengan pemodelan simulasi berbasis data teknis aktual. Parameter yang diuji meliputi *burden*, tahanan lilitan, dan tegangan titik lutut (*knee point voltage*). Hasil menunjukkan bahwa CT dengan rasio rendah seperti 300/5 A lebih cepat mengalami saturasi, sementara CT dengan rasio tinggi seperti 400/1 A dan 600/5 A menunjukkan performa lebih stabil dan linier terhadap gangguan. Tegangan lutut yang tinggi dan arus eksitasi yang rendah terbukti meningkatkan ketahanan terhadap saturasi. Temuan ini menegaskan pentingnya pemilihan rasio CT yang sesuai berdasarkan hasil pengujian langsung untuk meningkatkan keandalan dan selektivitas sistem proteksi.

Kata kunci: CT, rasio, *burden*, saturasi, tegangan titik lutut

Protection systems in medium-voltage distribution networks relied heavily on the accuracy of current transformers (CTs) in detecting faults and operating protection relays. During short-circuit conditions, CTs were prone to magnetic saturation, which resulted in inaccurate secondary current representation and compromised protection performance. This study evaluated the saturation characteristics of CTs on 20 kV feeders and identified ratio configurations that remained reliable under extreme fault currents. The method combined field testing at the 150 kV New Jakabaring Substation with simulation modeling based on actual technical data. The parameters tested included burden, winding resistance, and knee point voltage. The results showed that CTs with lower ratios, such as 300/5 A, saturated more quickly, while higher-ratio CTs, such as 400/1 A and 600/5 A, maintained more stable and linear performance during faults. Higher knee point voltages and lower excitation currents were proven to enhance resistance to saturation. These findings highlighted the importance of selecting CT ratios based on validated field results to improve the reliability and selectivity of protection systems.

Keywords: CTs, ratio, burden, saturation, knee point voltage

I. PENDAHULUAN

Keandalan sistem tenaga listrik sangat bergantung pada kinerja sistem proteksi, terutama dalam mendeteksi dan mengisolasi gangguan secara cepat dan akurat (Andika & Siregar, 2021; IEC, 2003). Pada jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV, transformator arus (CT) memegang peran penting dalam memastikan arus gangguan ditransformasikan secara tepat untuk keperluan pengukuran dan aktivasi relay proteksi (Budiarto & Lestari, 2020). Akan tetapi, dalam kondisi gangguan hubung singkat, CT berpotensi mengalami saturasi magnetik yang menyebabkan distorsi arus sekunder dan berisiko mengganggu kinerja proteksi (Susilo, 2022).

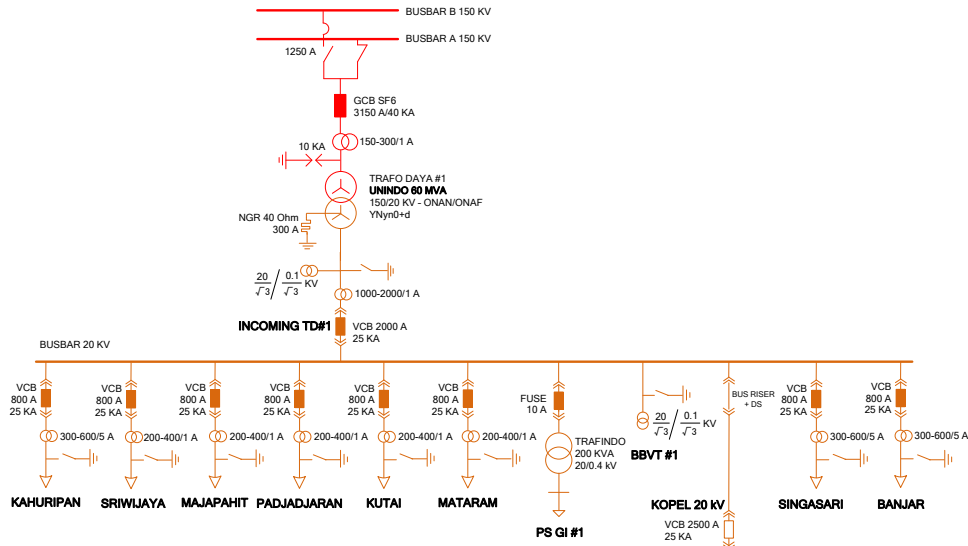
Data historis dari GI 150 kV New Jakabaring menunjukkan tingginya frekuensi gangguan pada beberapa saluran, khususnya penyulang Mataram dan Kutai. Dalam salah satu kejadian, arus hubung singkat mencapai 12 kA, melebihi kapasitas nominal beberapa CT yang terpasang. Kondisi ini menunjukkan perlunya evaluasi terhadap pemilihan rasio CT dan kemampuannya dalam mempertahankan akurasi saat terjadi arus gangguan ekstrem (Odinaev et al., 2021). Rasio yang terlalu rendah dapat menyebabkan arus sekunder yang tidak proporsional dan meningkatkan risiko saturasi, sedangkan rasio yang terlalu tinggi dapat mengurangi sensitivitas proteksi (Santoso & Widodo, 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik saturasi CT berdasarkan data pengujian lapangan dan simulasi arus hubung singkat (Sybille, G. 2020). Fokus utama adalah menilai apakah konfigurasi rasio CT yang digunakan saat ini mampu menghindari saturasi dan tetap bekerja dalam batas linear (Siregar &

Manurung, 2020). Hasil evaluasi ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis terkait pemilihan rasio CT yang optimal untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi pada jaringan distribusi 20 kV.

II. METODE PENELITIAN

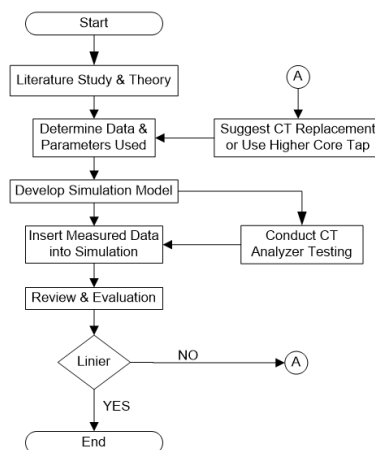
Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif untuk menganalisis kinerja CT pada kondisi hubung singkat dalam sistem distribusi 20 kV di Gardu Induk 150 kV New Jakabaring. Tujuan utamanya adalah untuk mengevaluasi apakah CT yang terpasang tetap beroperasi dalam zona kerja linear atau mengalami saturasi magnetik, yang berpotensi mengganggu keandalan proteksi arus lebih. Pada Gambar 1. Single Line Diagram, dijelaskan lokasi penelitian pada bay transformator daya 60 MVA #1 150/20 kV yang mempunyai 8 penyulang 20 kV beroperasi dengan rasio CT pada masing-masing penyulang 300-600/5 A dan 200-400/1 A.



Gambar 1. Single Line Diagram

Penelitian ini juga melengkapi dan memperluas cakupan dari studi-studi sebelumnya yang membahas pengujian karakteristik CT dalam sistem distribusi, seperti yang dilakukan oleh (Afrida et al., 2025) di gardu induk Natar, yang fokus pada pengujian rasio dan knee point tanpa memodelkan efek arus gangguan terhadap saturasi CT secara terintegrasi dalam simulasi numerik. Selain itu, berbeda pula dari analisis yang dilakukan oleh (Putra et al., 2022) di GI Rungkut, yang menyoroti pengaruh burden terhadap kesalahan pengukuran energi tanpa mengkaji lebih jauh dinamika saturasi akibat arus gangguan tinggi. Dalam penelitian ini, pendekatan gabungan antara pengujian lapangan dan simulasi dengan data aktual gangguan digunakan untuk mengevaluasi performa linier CT secara langsung terhadap kejadian ekstrem, memberikan kontribusi baru dalam penilaian empiris saturasi pada sistem distribusi 20 kV.

A. Prosedur Penelitian



Gambar 2. Alur Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui serangkaian tahapan yang sistematis untuk mengevaluasi performa CT dalam kondisi gangguan hubung singkat. Langkah-langkah utamanya meliputi:

1. Tinjauan literatur tentang prinsip operasi CT, saturasi, sistem proteksi, dan parameter utama (*V_{knee}*, *burden* rangkaian, resistansi belitan sekunder CT).
2. Pengumpulan data lapangan dan pengukuran langsung menggunakan alat analisis CT.
3. Perhitungan teoritis saturasi CT.
4. Simulasi kondisi gangguan menggunakan perangkat lunak DIgSILENT dan Mathcad.
5. Evaluasi dan interpretasi untuk menentukan kesesuaian CT dalam kondisi terjadi gangguan.

B. Peralatan dan Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah CT tipe proteksi dalam ruangan yang terpasang pada delapan penyulang 20 kV yang terhubung ke transformator daya 60 MVA di gardu induk 150 kV Jakabaring Baru. CT tersebut bertipe CTB-24, sesuai dengan standar IEC 61869-2, dan dirancang khusus untuk proteksi arus lebih dan gangguan tanah. Dua rasio tap dikonfigurasi dalam sistem.

1. Tap 1: 200/1 A dan 300/5 A, burden 15 VA
2. Tap 2: 400/1 A dan 600/5 A, burden 30 VA

Semua CT termasuk dalam Kelas 5P20 untuk proteksi dan 0,5FS10 untuk pengukuran, memastikan kesesuaiannya untuk pengukuran yang akurat dan pemicu relai yang andal selama kondisi gangguan. Tampilan fisik CT ditunjukkan pada Gambar 3, sedangkan spesifikasi teknisnya dirinci dalam Tabel 1.



Gambar 3. CT Indoor Penyulang 20 kV

Tabel 1. Spesifikasi CT yang diuji

Deskripsi	Spesifikasi
Type	: CTB-24
Highest Rated Voltage	: 24 kV
Rated Frequency	: 50 Hz
Insulation Class	: B
I _{th}	: 25 kA / 1s
I _{cth}	: 1.2 In
Burden	: 15 VA (Tap 1), 30 VA (Tap 2)
Class	: 5P20 (<i>Protection</i>), 0.5FS10 (<i>Metering</i>)

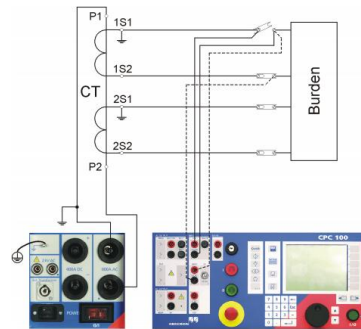
Pengujian dilakukan pada seluruh 8 penyulang 20 kV di GI New Jakabaring untuk memastikan representasi data. Pemilihan penyulang Sriwijaya dan kahuripan sebagai fokus analisis didasarkan pada frekuensi gangguan historis tertinggi (data PLN 2023-2025) dan mewakili variasi sekunder rasio 200-400/1 A dan 300-600/5 A.

C. Prosedur Pengukuran dan Pengujian

Prosedur pengujian dilakukan pada penyulang 20 kV di Gardu Induk New Jakabaring menggunakan instrumen diagnostik presisi: *OMICRON CPC 100* dan *Megger MRCT* (Lestari & Putra, 2020). Setiap CT menjalani serangkaian pengujian untuk mengukur kinerja dalam kondisi nominal dan gangguan guna memastikan kesesuaian terhadap spesifikasi proteksi sistem tenaga. Akurasi alat *OMICRON CPC 100* dan *Megger MRCT* divalidasi dengan kalibrasi standar IEC 61869-2 (ketidakpastian $\pm 0.2\%$). Pengukuran diulang 3 kali untuk meminimalkan kesalahan, dengan deviasi maksimal 0.5%. Hasil pengukuran yang digunakan adalah nilai rata-rata dari pengukuran berulang tersebut.

1. CT Ratio Test

Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi keakuratan rasio arus antara lilitan primer dan sekunder pada CT (Budiarto & Lestari, 2020). Alat *CT Analyzer* seperti *CPC 100* menginjeksikan arus tertentu pada sisi primer dan mengukur arus yang dihasilkan pada sisi sekunder. Rasio yang benar menunjukkan adanya proporsionalitas yang sesuai tanpa penyimpangan melebihi batas toleransi yang diperbolehkan menurut standar IEC 60044-1 (IEC, 2003). Rangkaian pengujian ditunjukkan pada Gambar 4. Alat ini mengukur *amplitudo* dan sudut fasa arus (pada I_1AC) dan tegangan (pada V_1AC) di sisi sekunder CT, serta menghitung rasio aktual dan menyimpangkannya dari rasio nominal.

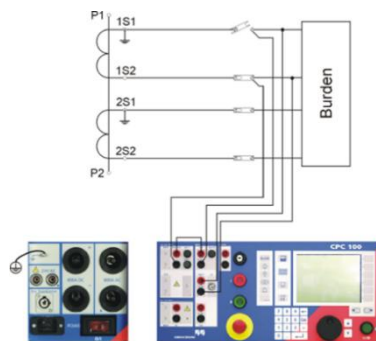


Gambar 4. Rangkaian Uji Rasio CT

Alat ini mengukur *amplitudo* dan sudut fasa arus (pada I_1AC) dan tegangan (pada V_1AC) di sisi sekunder CT, serta menghitung rasio aktual dan menyimpangkannya dari rasio nominal.

2. Burden Test

Pengujian ini mengukur impedansi total yang terhubung pada sisi sekunder CT, termasuk kabel dan relay proteksi (Hidayat & Nugroho, 2023). Beban yang terlalu besar dapat menyebabkan penurunan tegangan dan pengukuran arus yang tidak akurat, terutama saat terjadi gangguan arus besar. Rangkaian pengujian ini sesuai dengan ketentuan IEC 60044-1 dan ditunjukkan pada Gambar 5 (IEC, 2003).

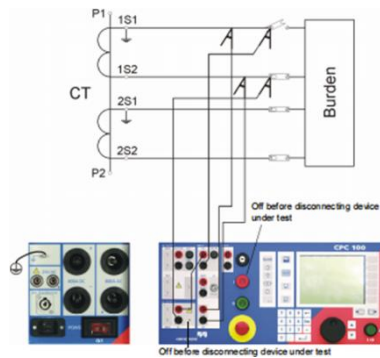


Gambar 5. Rangkaian Uji Burden CT

Alat ini akan menyuntikkan sinyal uji kecil dan mengukur respon impedansi beban. Hasil pengukuran akan menunjukkan nilai burden aktual, yang kemudian dibandingkan dengan spesifikasi CT untuk menentukan kelayakan instalasi.

3. Secondary Winding Resistance Test

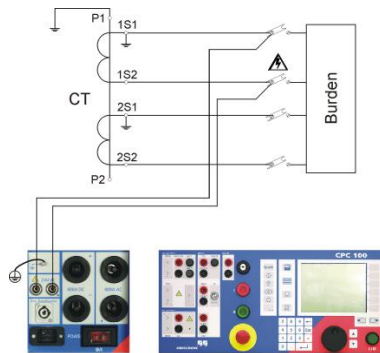
Pengujian tahanan lilitan mengukur nilai resistansi (dalam ohm) pada kumparan sekunder CT menggunakan arus searah (DC) rendah (Lestari & Putra, 2020). Nilai tahanan yang tinggi dapat mengindikasikan kerusakan internal, sambungan yang kurang baik, atau konduktor yang telah menua (Siregar & Manurung, 2020). Rangkaian pengujian ini sesuai dengan panduan IEC 60044-1 dan ditunjukkan pada Gambar 6 (IEC, 2003).



Gambar 6. Rangkaian Uji Belitan Sekunder CT

4. Knee Point Voltage (V_{knee}) dan Excitation Test

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan titik saturasi pada inti CT (Hargrave & Heilman 2020). Kurva eksitasi diperoleh dengan memberikan tegangan bertingkat pada lilitan sekunder sementara sisi primer dalam keadaan terbuka. Titik lutut (knee point) diidentifikasi ketika kenaikan tegangan sebesar 10% menyebabkan peningkatan arus eksitasi sebesar 50%. Knee point voltage didefinisikan sebagai tegangan saat arus mulai meningkat tajam dengan kenaikan tegangan yang kecil sesuai dengan standar IEC 61869-2 (IEC, 2012). Rangkaian pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Rangkaian Uji Tegangan Eksitasi CT

D. Data Arus Hubung Singkat dan Impedansi Sumber

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai arus gangguan pada sisi 20 kV untuk masing-masing penyulang bervariasi, tergantung pada panjang jaringan, beban, dan impedansi sistem. Simulasi gangguan dilakukan menggunakan perangkat lunak *DigSILENT PowerFactory* dengan skenario gangguan tiga fasa simetris (*balanced fault*) dan gangguan fasa-tanah (*single-line to ground fault*) untuk mendapatkan karakteristik arus hubung singkat maksimal. Durasi gangguan diset selama 200 milidetik untuk merepresentasikan waktu clearing yang realistis pada sistem distribusi. Besar arus gangguan pada busbar GI New Jakabaring dapat dilihat pada Tabel 2, sedangkan data lengkap hasil simulasi arus gangguan satu fasa dan tiga fasa pada transformator daya #1 dan #2 ditunjukkan dalam Tabel 3. Impedansi sistem tidak diukur langsung, tetapi dimodelkan menggunakan pendekatan impedansi *Thevenin*, yang menggabungkan impedansi transformator daya, saluran distribusi, dan sumber induk. Transformator daya 150/20 kV dimodelkan sesuai nameplate dengan impedansi sebesar 12,17%. Perhitungan pendukung juga dilakukan secara numerik menggunakan aplikasi *Mathcad* untuk memverifikasi nilai arus dan impedansi hasil simulasi.

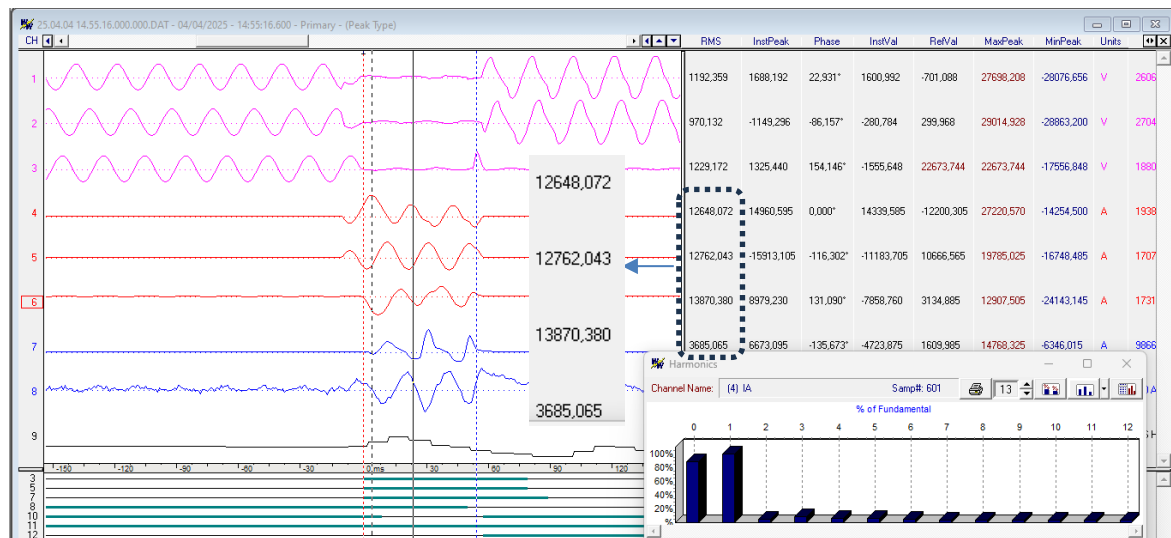
Tabel 2. Data Arus Hubung Singkat & Impedansi Sumber

Substation	Voltage Ratio (kV)	Short Circuit		Positive Sq. (pu)		Negative Sq. (pu)		Zero Sq. (pu)	
		3phs (kA)	1phs (kA)	R1	X1	R2	X2	R0	X0
New Jakabaring	150	15.679	15.440	0,005	0,024	0,005	0,024	0,004	0,023

Tabel 3. Data Arus Hubung Singkat Transformator Daya

Substation	Bay	Voltage Ratio (kV)	Short Circuit	
			1phs (A)	3phs (A)
New Jakabaring	TRAFO 60 MVA #1	150/20	288	11.436
	TRAFO 60 MVA #2	150/22	317	11.592

Berdasarkan hasil pengukuran aktual yang terekam melalui perangkat perekam gangguan pada Penyulang Kutai, diperoleh nilai arus gangguan puncak yang secara signifikan lebih tinggi dibandingkan dengan nilai hasil simulasi kalkulasi pendekatan. Pada gambar ditunjukkan bahwa arus gangguan fasa A mencapai puncak lebih dari 14.000 A, dengan nilai *RMS* di atas 12.000 A. Nilai ini berada di atas estimasi arus hubung singkat simetris tiga fasa yang diperoleh dari model *DIGSILENT* dan perhitungan manual sebelumnya. Perbedaan ini menunjukkan bahwa sistem sesungguhnya memiliki karakteristik dinamis yang lebih ekstrem, sehingga penggunaan CT dengan rasio rendah pada kondisi tersebut sangat berisiko mengalami kejenuhan (Odinaev et al., 2021). Oleh karena itu, data terekam ini dijadikan acuan tambahan dalam simulasi penilaian performa CT agar mencerminkan skenario arus gangguan terburuk yang mungkin terjadi di lapangan. Permasalahan ini dapat diminimumkan dengan menggunakan rasio CT tertinggi yang kompatibel dengan relay dan instrumen yang berarus rendah (Santoso & Widodo, 2024).

**Gambar 8. Rekaman Besar Arus Gangguan Penyulang Kutai**

E. Model Evaluasi Saturasi

Evaluasi saturasi pada CT dilakukan untuk mengetahui apakah tegangan yang timbul pada sisi sekunder saat terjadi gangguan melebihi tegangan titik lutut (knee point voltage) dari CT tersebut (Hidayat & Nugroho, 2023). Jika tegangan sekunder melebihi nilai titik lutut, maka CT akan memasuki kondisi saturasi, yang menyebabkan arus sekunder tidak lagi proporsional terhadap arus primer (IEC, 2012).

Model evaluasi ini melibatkan perbandingan antara tegangan eksitasi teoritis yang dihitung berdasarkan arus gangguan yang terbaca pada sisi sekunder CT (I_s), tahanan lilitan CT (R_{ct}) dan impedansi rangkaian sekunder *burden* (R_b), dengan nilai tegangan titik lutut hasil pengujian (Wahyuni & Prasetyo, 2022). Tegangan sekunder (V_s) dihitung menggunakan persamaan sederhana berikut:

$$V_s = I_s \times (R_b + R_{ct}) \quad (1)$$

Sebagai contoh untuk CT kelas proteksi 5P20 dengan rasio 300/5 A, tahanan lilitan sebesar 0,35 *ohm* dan beban rangkaian sekunder (kabel, *terminal block* dan relay proteksi) sebesar 0,08 *ohm*, dengan asumsi gangguan sebesar 6000 *Ampere* mempunyai tegangan sekunder sebesar 44 *Volt*.

Kinerja CT sangat dipengaruhi oleh keberadaan komponen *DC* dalam arus gangguan. Saat terjadi perubahan mendadak dalam sistem arus bolak-balik (*AC*), seperti saat gangguan hubung singkat, arus yang mengalir tidak hanya mengandung komponen *AC*, tetapi juga komponen *DC offset*. Komponen *DC* ini muncul sebagai akibat dari kondisi sistem yang sebelumnya sudah berjalan, serta karakteristik induktif dari jaringan (Susilo, 2022). Dalam sistem yang sangat induktif, arus cenderung mencapai puncaknya ketika tegangan masih mendekati nol. Hal ini menyebabkan bentuk gelombang arus menjadi asimetris, terutama pada awal terjadinya gangguan (Siregar & Manurung, 2020).

Rasio antara reaktansi dan resistansi sistem (*X/R ratio*) memainkan peran penting dalam menentukan apakah CT akan mengalami kejenuhan saat terjadi gangguan. Semakin tinggi nilai *X/R*, semakin besar kemungkinan timbulnya komponen arus *DC offset* dan semakin lama waktu yang dibutuhkan hingga komponen tersebut mereda. Hal ini berimplikasi langsung pada kemampuan CT dalam merepresentasikan arus gangguan secara akurat ke sisi sekunder. Salah satu pendekatan matematis untuk menentukan kondisi kejenuhan CT dinyatakan dalam rumus berikut:

$$20 \geq \left| \frac{X}{R} + 1 \right| \cdot I_F \cdot Z_b \quad (2)$$

Di mana I_F adalah arus gangguan maksimum, Z_b adalah impedansi total pada sisi sekunder, dan *X/R* adalah rasio impedansi sumber primer. Rumus ini digunakan untuk mengevaluasi apakah tegangan eksitasi yang dibutuhkan masih berada dalam batas linier dari karakteristik magnetik CT. Pendekatan ini banyak dijadikan acuan dalam praktik sistem proteksi modern karena mempertimbangkan pengaruh simultan dari arus gangguan, *burden*, dan karakteristik sumber sistem (Zocholl, 2000; Roberts, Benmouyal, & Zocholl, 2011).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian lapangan secara menyeluruh dilakukan pada saluran 20 kV di Gardu Induk 150 kV New Jakabaring untuk mengevaluasi kinerja operasional CT. Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi linearitas CT, ambang batas saturasi, dan keakuratan sistem proteksi. Parameter yang diukur dan divalidasi meliputi keakuratan rasio, tahanan lilitan (*Rct*), beban (*burden*), serta tegangan titik lutut (*V_{knee}*), dengan acuan standar IEC 60044-1 dan IEC 61869-2.

1. Pengujian CT Ratio

CT terlebih dahulu diuji untuk mengukur keakuratan transformasi rasionya menggunakan metode injeksi standar. Tabel 4 dan Tabel 5 menyajikan hasil pengujian rasio untuk feeder Kutai dan Kahuripan secara berturut-turut. Kedua CT menunjukkan kesalahan arus yang jauh di bawah batas toleransi $\pm 1\%$ yang diperbolehkan untuk kelas proteksi 5P, yang mengonfirmasi bahwa CT beroperasi secara linear dalam kondisi normal.

Tabel 4. Hasil Uji Rasio CT Penyulang Sriwijaya (200-400/1 A)

Core	Ratio	Fasa R			Fasa S			Fasa T		
		Ratio	% Error	Polarity	Ratio	% Error	Polarity	Ratio	% Error	Polarity
1S1-1S2	200 / 1 A	200,01	-0,299	OK	199,99	-0,294	OK	200,03	-0,336	OK
1S1-1S3	400 / 1 A	400,00	-0,086	OK	400,00	-0,089	OK	400,03	-0,101	OK

Tabel 5. Hasil Uji Rasio CT Penyulang Kahuripan (300-600/5 A)

Core	Ratio	Fasa R			Fasa S			Fasa T		
		Ratio	% Error	Polarity	Ratio	% Error	Polarity	Ratio	% Error	Polarity
1S1-1S2	300 / 5 A	297,41	-0,860	OK	299,34	-0,219	OK	297,43	-0,858	OK
1S1-1S3	600 / 5 A	597,59	-0,402	OK	599,43	-0,094	OK	597,57	-0,405	OK

Berdasarkan hasil observasi, seluruh CT yang diuji berada dalam rentang toleransi $\pm 1\%$ untuk kelas 5P, yang menegaskan bahwa CT tersebut telah memenuhi persyaratan akurasi proteksi (Dewanto & Kusuma, 2019).

2. Pengujian Error Ratio & Phase Displacement

Pengujian lanjutan dilakukan untuk mengukur kesalahan rasio dan pergeseran fasa pada berbagai tingkat pembebanan dan nilai *burden* yang berbeda. Hasil pengujian (Tabel 6-9) menunjukkan bahwa CT mampu mempertahankan akurasi yang lebih baik dan pergeseran fasa yang minimal saat arus mendekati 100% dari nilai nominalnya. CT dengan nilai *burden* yang lebih tinggi (misalnya 30 VA) menghasilkan kesalahan yang lebih rendah dan lebih tahan terhadap pergeseran fasa.

Ada 2 Sampel pengukuran yang ditampilkan untuk mewakili rasio CT 200-400/1 A oleh penyulang Sriwijaya dan rasio CT 300-600/5 A diwakili oleh Penyulang Kahuripan.

Tabel 6. Error Rasio fasa-R Tap-2 Penyulang Sriwijaya

VA / PF	Ratio Error (%) at % of Rated Current							
	1	5	10	20	50	100	120	200
30,0 VA/ 0,8	-0,026	0,063	0,0924	0,1177	0,1459	0,1641	0,1683	0,1774
15,0 VA/ 0,8	0,0741	0,1318	0,1508	0,167	0,1852	0,1969	0,1997	0,207
7,50 VA/ 0,8	0,1313	0,171	0,1841	0,1952	0,2077	0,2157	0,2177	0,2228
3,75 VA/ 1,0	0,174	0,2003	0,209	0,2164	0,2249	0,2304	0,2318	0,2354
1,21 VA/ 1,0	0,1911	0,212	0,2189	0,2248	0,2314	0,2357	0,2367	0,2396

Tabel 7. Phase Displacement fasa-R Tap-2 Penyulang Sriwijaya

VA / PF	Ratio Error (%) at % of Rated Current							
	1	5	10	20	50	100	120	200
30,0 VA/ 0,8	1,5214	1,102	0,9967	0,9434	0,9577	0,9938	0,9888	0,7586
15,0 VA/ 0,8	1,4803	1,0372	0,9045	0,8063	0,7331	0,7185	0,7178	0,7059
7,50 VA/ 0,8	1,5091	1,0446	0,898	0,7801	0,6676	0,6154	0,6059	0,5852
3,75 VA/ 1,0	2,3766	1,6346	1,3945	1,1938	0,9826	0,8602	0,8329	0,7657
1,21 VA/ 1,0	1,8874	1,2971	1,1055	0,9447	0,7738	0,6732	0,6506	0,5949

Tabel 8. Error Rasio fasa-R Tap-2 Penyulang Kahuripan

VA / PF	Ratio Error (%) at % of Rated Current							
	1	5	10	20	50	100	120	200
30,0 VA/ 0,8	0,1831	0,2672	0,2935	0,315	0,3376	0,3509	0,3539	0,3616
15,0 VA/ 0,8	0,256	0,3146	0,3328	0,3478	0,3636	0,3728	0,3749	0,3802
7,50 VA/ 0,8	0,2975	0,3414	0,3551	0,3664	0,3782	0,3851	0,3867	0,3906
3,75 VA/ 1,0	0,3316	0,3635	0,3734	0,3816	0,3901	0,395	0,3961	0,3987
30,0 VA/ 0,8	0,1831	0,2672	0,2935	0,315	0,3376	0,3509	0,3539	0,3616

Tabel 9. Phase Displacement fasa-R Tap-2 Penyulang Kahuripan

VA / PF	Ratio Error (%) at % of Rated Current							
	1	5	10	20	50	100	120	200
30,0 VA/ 0,8	4,3783	2,8147	2,3149	1,8889	1,4059	1,0771	0,9936	0,7692
15,0 VA/ 0,8	3,9114	2,5215	2,0815	1,7112	1,303	1,0373	0,9716	0,7953
7,50 VA/ 0,8	3,6885	2,3805	1,9681	1,6232	1,2479	1,0094	0,9515	0,7975
3,75 VA/ 1,0	4,0752	2,632	2,1782	1,8001	1,3925	1,138	1,0771	0,9173
30,0 VA/ 0,8	4,3783	2,8147	2,3149	1,8889	1,4059	1,0771	0,9936	0,7692

3. Pengujian Resistansi CT

Tahanan lilitan (winding resistance) dari CT diukur dan disesuaikan pada suhu standar 75°C untuk memastikan kesesuaian terhadap kenaikan suhu selama kondisi gangguan. Tabel 10 merangkum nilai Rct, di mana CT dengan rating sekunder 1 A menunjukkan tahanan yang lebih tinggi akibat jumlah lilitan yang lebih banyak, namun seluruh hasil pengukuran konsisten pada ketiga fasa.

Tabel 10. Resistansi CT Penyulang Kahuripan & Sriwijaya

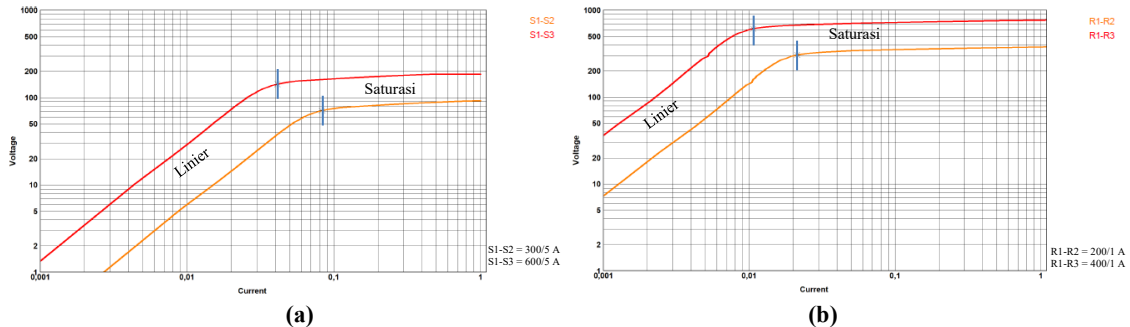
Feeders	Tap Ratio	R		S		T	
		Resist. (Ohms)	Resist. At 75°C	Resist. (Ohms)	Resist. At 75°C	Resist. (Ohms)	Resist. At 75°C
Kahuripan	300/5 A	0,322	0,378	0,333	0,391	0,272	0,319
	600/5 A	0,614	0,721	0,501	0,588	0,567	0,666
Sriwijaya	200/1 A	3,042	3,587	3,149	3,712	3,023	3,565
	400/1 A	6,040	7,122	6,268	7,39	6,125	7,211

4. Pengujian Tegangan Knee Point (Vknee)

Pengujian kurva eksitasi dilakukan untuk menentukan nilai tegangan titik lutut (Vk). Tabel 11 menunjukkan bahwa CT dengan rasio yang lebih tinggi (misalnya 400/1 A dan 600/5 A) memiliki nilai Vk yang lebih besar dan arus eksitasi yang lebih rendah, yang mengindikasikan inti magnetik yang lebih kuat serta ketahanan terhadap saturasi yang lebih baik. Temuan ini didukung oleh kurva magnetisasi yang ditampilkan pada Gambar 9.

Tabel 11. Hasil Uji Tegangan Knee Point

Feeders	Ratio	R		S		T	
		V-meas (V)	I-meas (A)	V-meas (V)	I-meas (A)	V-meas (V)	I-meas (A)
Kahuripan	300/5 A	71,226	0,0829	73,033	0,0893	75,664	0,0848
	600/5 A	143,09	0,0413	146,76	0,0444	151,95	0,0422
Sriwijaya	200/1 A	307,29	0,0213	299,25	0,0194	294,92	0,0206
	400/1 A	615,06	0,0106	599,54	0,0097	591,06	0,0103

**Gambar 9. (a) Kurva Magnetisasi CT Fasa-R Penyulang Kahuripan, (b) Kurva Magnetisasi CT Fasa-R Penyulang Sriwijaya**

5. Pengukuran Beban Rangkaian (*Burden*)

Nilai *burden* dihitung berdasarkan konfigurasi pengkabelan aktual dan perangkat yang terhubung. Tabel 12 menunjukkan bahwa nilai *burden* yang diukur jauh lebih rendah dibandingkan dengan nilai *nameplate* sebesar 30 VA, yang mengindikasikan risiko saturasi akibat beban berlebih sangat kecil.

Tabel 12. *Burden* Fasa-R Penyulang Kahuripan & Sriwijaya

Feeders	VA Nameplate	Ratio	<i>Burden</i>			
			Current	VA	PF	Phase Angle
Kahuripan	30 VA	300-600/5 A	5,114	2,125	1,00	358°
Sriwijaya	30 VA	200-400/1 A	1,032	1,207	1,00	359°

6. Perhitungan Arus Hubung Singkat dan Impedansi Sumber

Dengan menggunakan perangkat lunak *DigSILENT* dan *Mathcad*, arus hubung singkat tiga fasa simetris maksimum diperkirakan sebesar 12,64 kA. Nilai ini divalidasi dengan data gangguan yang tercatat pada penyulang Kutai yang terjadi (Ardiansyah & Rahmatullah, 2021) (Gambar 10), yang menunjukkan bahwa arus gangguan aktual sesuai dengan hasil simulasi.

Monday 21 April 2025 09:56:30.327 : Fault Recorded
 Description: P142_OUTGOING 2
 Plant reference: 20KV GI JAKBRING
 Model number: P142316A6M0460J
 Event type: Fault record
 Fault Time: Monday 21 April 2025 09:56:30.226
 Active Group: 1
 System Frequency: 50.19 Hz
 IA: 248.5 A
 IB: 308.3 A
 IC: 459.6 A
 VAB: 20.44kV
 VBC: 20.14kV
 VCA: 20.03kV
 IN Measured: 0 A
 IN Derived: 0 A
 IN Sensitive: 0 A
 VAN: 11.69kV
 VBN: 11.77kV
 VCN: 11.53kV
 VN Derived: 0 V

Gambar 10. Rekaman Arus Gangguan Penyulang Kutai

7. Analisis Perhitungan Tegangan Knee Point

Berdasarkan IEC 60044-1, knee point (V_k) didefinisikan sebagai tegangan sekunder dimana Kenaikan tegangan sebesar 10% menyebabkan peningkatan arus eksitasi (I_e) sebesar 50%. CT dianggap mulai saturasi jika tegangan sistem melebihi (V_k). Sedangkan (V_s) adalah tegangan sisi sekunder CT yang didapatkan berdasarkan hasil perhitungan.

Tabel 13. Tegangan V_k pada Tap Rasio Kecil

Feeders	Rasio (A)	V_k -cal (V)	V_k -mea (V)
Banjar	300/5	96,00	72,31
Singosari	300/5	96,00	71,77
Mataram	200/1	360,00	293,48
Kutai	200/1	360,00	291,53
Padjajaran	200/1	360,00	295,43
Majapahit	200/1	360,00	288,36
Sriwijaya	200/1	360,00	295,25
Kahuripan	300/5	96,00	71,23

Tabel 14. Tegangan V_k pada Tap Rasio Besar

Feeders	Rasio (A)	V_k -cal (V)	V_k -mea (V)
Banjar	600/5	156,00	145,26
Singosari	600/5	156,00	144,17
Mataram	400/1	607,20	589,75
Kutai	400/1	607,20	582,34
Padjajaran	400/1	607,20	594,21
Majapahit	400/1	607,20	580,84
Sriwijaya	400/1	607,20	615,06
Kahuripan	600/5	156,00	143,09

$V_k > V_s$, maka CT linier, sedangkan $V_k < V_s$, maka CT saturasi (3)

Untuk V_k didapatkan dari hasil pengukuran CT untuk masing-masing tap rasio. V_k juga dapat dihitung menggunakan pendekatan seperti dibawah ini sehingga perbandingan V_k uji dan V_k hitung dapat dilihat pada Tabel 13 dan Tabel 14.

Perbedaan antara tegangan titik lutut hasil kalkulasi (V_k -cal) dan hasil pengukuran (V_k -meas), seperti pada CT Banjar 300/5 A (V_k -cal = 96 V dan V_k -meas = 72,31 V), dapat terjadi karena beberapa hal. Nilai kalkulasi biasanya menggunakan data ideal dari nameplate atau rumus umum, yang belum tentu sama dengan kondisi sebenarnya di lapangan. Selain itu, karakteristik fisik CT bisa berubah akibat proses manufaktur, jumlah lilitan, atau karena penuaan material. Pengukuran di lapangan yang dilakukan dengan *CT Analyzer* juga memiliki batas akurasi tertentu. Oleh sebab itu, nilai V_k hasil pengukuran dianggap lebih akurat untuk menilai kondisi nyata dan digunakan sebagai acuan utama dalam analisis saturasi.

Dengan memasukkan hasil pengujian lain seperti R_{ct} , VA burden, I burden serta pf , perhitungan arus hubung singkat dan X/R ratio maka untuk V_s kita dapatkan.

Tabel 15. Tegangan Sekunder (V_s) pada Rasio Tap Kecil

Feeders	Ratio CT		Class	VA Nameplate	Simulation SC		Test Results	V_s	Criteria
	Primer 1S1-1S2	Sekunder		1S1-1S2	IHS 3phs (A)	X/R Ratio	V_{knee} 1S1-1S2		
Banjar	300	5	5P20	15	12640	0,7	72,314	154,840	1
Singosari	300	5	5P20	15	12640	0,7	71,770	158,615	1
Mataram	200	1	5P20	15	12640	0,7	293,480	363,224	1
Kutai	200	1	5P20	15	12640	0,7	291,530	366,822	1
Padjajaran	200	1	5P20	15	12640	0,7	295,430	366,333	1
Majapahit	200	1	5P20	15	12640	0,7	288,360	369,133	1
Sriwijaya	200	1	5P20	15	12640	0,7	295,250	415,450	1
Kahuripan	300	5	5P20	15	12640	0,7	71,226	162,474	1

Tabel 16. Tegangan Sekunder (Vs) pada Rasio Tap Besar

Feeders	Ratio CT		Class	VA	Simulation SC		Test	Vs	Criteria
	Primer 1S1-1S2	Sekunder		Nameplate	IHS 3phs (A)	X/R Ratio	Vknee		
				1S1-1S2			1S1-1S2		0 = linear 1 = saturasi
Banjar	600	5	5P20	30	12640	0,7	145,260	126,842	0
Singosari	600	5	5P20	30	12640	0,7	144,170	134,729	0
Mataram	400	1	5P20	30	12640	0,7	589,750	351,421	0
Kutai	400	1	5P20	30	12640	0,7	582,340	351,930	0
Padjajaran	400	1	5P20	30	12640	0,7	594,210	350,988	0
Majapahit	400	1	5P20	30	12640	0,7	580,840	352,012	0
Sriwijaya	400	1	5P20	30	12640	0,7	615,060	397,625	0
Kahuripan	600	5	5P20	30	12640	0,7	143,090	132,808	0

Dari keterangan Tabel 15 terlihat bahwa pada rasio tap kecil $V_k < V_s$ sehingga potensi terjadinya CT saturasi sangat tinggi pada arus gangguan maksimum. Pada Tabel 16 terlihat bahwa pada rasio tap besar $V_k > V_s$ sehingga potensi terjadinya CT saturasi pada arus gangguan maksimum tidak terjadi.

Potensi terjadinya CT saturasi pada rasio tap besar (600/5 A dan 400/1 A) dapat terjadi jika X/R ratio lebih besar dari pada 1 (X/R ratio > 3). Selain itu peningkatan besar arus gangguan juga berpengaruh terhadap potensi terjadinya kejenuhan pada CT. Sedangkan potensi kejenuhan CT dari sisi *burden* rangkaian dapat kita hindari dengan menggunakan kapasitas diameter kabel *wiring* CT diatas 4mm² dan juga tidak ada rangkaian tambahan selain daripada relay proteksi itu sendiri.

Tabel 17. Tegangan Sekunder (Vs) pada X/R Rasio ≥ 3

Feeders	Rasio CT		Class	VA	Hasil Simulasi		Hasil	Vs	Kriteria
	Primer 1S1-1S3	Sekunder		Nameplate	Digsilent	Pengujian	0 = linear 1 = saturasi		
				1S1-1S3	IHS 3phs (A)	X/R Rasio			Vknee 1S1-1S3
Banjar	600	5	5P20	30	12640	3	145,260	298,452	1
Singosari	600	5	5P20	30	12640	3	144,170	317,009	1
Mataram	400	1	5P20	30	12640	3	589,750	826,873	1
Kutai	400	1	5P20	30	12640	3	582,340	828,072	1
Padjajaran	400	1	5P20	30	12640	3	594,210	825,853	1
Majapahit	400	1	5P20	30	12640	3	580,840	828,263	1
Sriwijaya	400	1	5P20	30	12640	3	615,060	935,588	1
Kahuripan	600	5	5P20	30	12640	3	143,090	312,490	1

8. Analisis Berdasarkan Faktor Kejenuhan CT (ALF)

Perhitungan titik jenuh pada CT terpasang untuk masing-masing penyulang juga dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini:

$$n = n_{ALF} \times \frac{S_n + R_{CT} + I_{sn}^2}{S + R_{CT} + I_{sn}^2} \quad (4)$$

Pada CT rasio 600/5 A untuk arus primer atau arus gangguan sebesar 12,64 kA maka disisi sekundernya mengalir arus sebesar 21,07 A. Sedangkan pada CT rasio 400/1 A untuk arus gangguan atau arus primer sebesar 12,64 kA mengalir arus 31,6 A sisi sekunder CT.

Tabel 18. Perhitungan Faktor Kejenuhan CT Tap Rasio Besar

Feeders	Rasio CT		Class	ALF	VA	Hasil	n	Arus Sekunder Is	Kriteria
	Primer 1S1-1S3	Sekunder			Nameplate	Simulasi			0 = OK 1 = NOK
					1S1-1S3	IHS 3phs (A)			
Banjar	600	5	5P20	20	30	12640	40,31	21,07	0
Singosari	600	5	5P20	20	30	12640	40,28	21,07	0
Mataram	400	1	5P20	20	30	12640	98,79	31,60	0
Kutai	400	1	5P20	20	30	12640	98,63	31,60	0
Padjajaran	400	1	5P20	20	30	12640	98,64	31,6	0
Majapahit	400	1	5P20	20	30	12640	98,67	31,60	0
Sriwijaya	400	1	5P20	20	30	12640	90,55	31,60	0
Kahuripan	600	5	5P20	20	30	12640	40,27	31,60	0

Berdasarkan hasil perhitungan dengan arus hubung singkat sebesar 12,64 kA pada CT rasio 600/5 A dan CT rasio 400/1 A dapat digunakan dengan baik karena nilai sekunder arus gangguan lebih kecil dari pada arus pengenalan maksimum pada sisi sekunder masing-masing CT tersebut.

9. Rekomendasi Penerapan Rasio CT

Berdasarkan pada masing-masing hasil pengujian dan juga perhitungan dari CT Penyulang 20 kV pada bay transformator daya 60 MVA #1 di GI New Jakabaring didapatkan rekomendasi untuk rasio CT terpasang dengan kondisi aktual sesuai dengan keadaan dilapangan saat itu. Rasio 600/5 A dan rasio 400/1 A masih cukup baik untuk bekerja secara optimal pada sisi CT proteksi Penyulang. Untuk Rekomendasi lengkap ada pada tabel 20 dibawah.

Tabel 20. Data CT Penyulang yang Digunakan

Feeders	CT Ratio (A)	Class	ALF	VA
Banjar	600/5	5P20	20	30
Singosari	600/5	5P20	20	30
Mataram	400/1	5P20	20	30
Kutai	400/1	5P20	20	30
Padjajaran	400/1	5P20	20	30
Majapahit	400/1	5P20	20	30
Sriwijaya	400/1	5P20	20	30
Kahuripan	600/5	5P20	20	30

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan rasio transformator arus (CT) sangat memengaruhi keandalan sistem proteksi pada jaringan distribusi 20 kV. CT dengan rasio kecil, seperti 200/400/1 A, terbukti lebih mudah mengalami saturasi saat terjadi gangguan besar. Sebaliknya, CT dengan rasio lebih tinggi, seperti 400/1 A dan 600/5 A, memiliki tegangan titik lutut (V_k) yang lebih tinggi dan arus eksitasi lebih rendah, sehingga lebih tahan terhadap saturasi dan memberikan sinyal arus yang akurat ke relay proteksi.

Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian, disarankan agar CT 600/5 A hanya digunakan jika nilai X/R sistem ≤ 3 untuk mencegah kejenuhan. Selain itu, pengujian ulang performa CT sebaiknya dilakukan secara berkala, minimal setiap 2 tahun, guna mendeteksi perubahan karakteristik akibat penuaan. Ke depan, riset lanjutan dapat mengkaji pengaruh harmonik dan transien switching terhadap saturasi CT, serta mengevaluasi potensi penggunaan CT digital dan algoritma proteksi adaptif.

DAFTAR PUSTAKA

- Afrida, Y., Riski, S., & Widodo, E. (2025). *Analisis Evaluasi Rasio CT dan Tegangan Titik Lutut pada Penyulang GI Natar Menggunakan CT Analyzer*. *Electrician*, 5(1), 10–19
- Andika, R. P., & Siregar, H. (2021). *Analisis Saturasi Transformator Arus pada Sistem Proteksi Distribusi 20 kV*. *Jurnal Teknik Elektro Universitas Indonesia*, 12(2), 45–52.
- Ardiansyah, H., & Rahmatullah, A. (2021). *Implementasi Simulasi Arus Gangguan pada Proteksi Sistem Tenaga*. *Jurnal Teknik Elektro Terapan*, 7(1), 20–28.
- Budiarto, M., & Lestari, T. (2020). *Analisis error ratio dan pergeseran fasa pada CT proteksi*. *Media Elektro*, 8(1), 34–42.
- Dewanto, F., & Kusuma, H. (2019). *Perbandingan Performa CT Kelas 5P dan 10P pada Arus Gangguan*. *Rekayasa Teknik Elektro*, 3(2), 101–109.
- Hargrave, A., Thompson, M. J., & Heilman, B. (2020). *Beyond the knee point: A practical guide to CT saturation*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
- Hidayat, T., & Nugroho, D. (2023). *Pengaruh Saturasi CT terhadap Ketelitian Pengukuran Arus pada Sistem Proteksi*. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa*, 9(3), 27–35.
- IEC. (2003). *Current transformers – Part 1: General requirements (IEC 60044-1)*. International Electrotechnical Commission.

- IEC. (2012). *Instrument transformers – Part 2: Additional requirements for current transformers (IEC 61869-2)*. International Electrotechnical Commission.
- Lestari, M., & Putra, A. (2020). *Studi Eksperimental Saturasi Transformator Arus pada Jaringan Tegangan Menengah*. Jurnal Ilmiah Teknik Elektro, 8(2), 15–22.
- Nugroho, C., Prasetyo, D. A., & Hadi, S. (2022). *Analisis Pengaruh Beban terhadap Deviasi Pembacaan Energi pada CT Indoor di GI Rungkut*. Senakama: Seminar Nasional Teknik Elektro, 7(2), 45–52
- Odinaev, I. S., Pazderin, A. V., Murzin, P. V., Tashchilin, V. A., Samoylenko, V. V., & Goziev, B. N. (2021). *Detection of the initial region of the current transformer core saturation*. Renewable Energy and Power Quality Journal, 19, 477–481.
- Roberts, J., Benmouyal, G., & Zocholl, S. E. (2011). *Selecting CTs to Optimize Relay Performance*. SEL Journal of Reliable Power, 2(3), 1–10
- Sybille, G. (2020). *Current transformer saturation: Measurement distortion and simulation*. IEEE Transactions on Power Delivery, 35(2), 1–8.
- Santoso, R., & Widodo, S. (2024). *Implementasi Algoritma Deteksi Saturasi CT Berbasis Wavelet pada Sistem Proteksi*. Jurnal Sistem Tenaga, 10(1), 55–63.
- Siregar, A. L., & Manurung, E. (2020). *Evaluasi tegangan knee point dan rasio saturasi CT*. Jurnal Teknik Listrik, 9(1), 55–63.
- Susilo, H. (2022). *Perbandingan pengaruh X/R ratio terhadap saturasi CT dalam gangguan transien*. Jurnal Teknologi Kelistrikan, 10(2), 94–102.
- Wahyuni, S., & Prasetyo, B. (2022). *Evaluasi Kinerja CT pada Kondisi Arus Hubung Singkat Menggunakan Simulasi MATLAB*. Jurnal Energi dan Kelistrikan, 14(1), 33–40.
- Zocholl, S. E. (2000). *Analyzing and Applying Current Transformers*. Pullman, WA: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.