

Proteksi Arus Netral dan Suhu Transformator Berbasis IoT Dampak Beban Tidak Seimbang

Rafii Ariesandi Rola Pratama^{a)}, Indhana Sudiharto^{a)}, Suhariningsih^{a)}

(Received 3 September 2024 || Revised 11 Februari 2025 || Published 30 Juni 2025)

Abstract: Current imbalance results in neutral current and an increase in the temperature of the distribution transformer body. Due to the large number and scattered locations, maintenance of the transformers is carried out at least three times a year. Therefore, the authors developed a laboratory-scale device, which is a miniature neutral current and temperature increase protection system based on the Internet of Things (IoT). The results from the laboratory-scale testing of this protection system will disconnect the load when the current imbalance reaches $\geq 25\%$ and the body temperature reaches $\geq 90^\circ\text{C}$. Notifications will be sent to Telegram if the load current imbalance is in the range of 10%-14% (sufficient), 15%-24% (insufficient), and $\geq 25\%$ (poor), and temperatures of $83\text{-}84^\circ\text{C}$ (sufficient), $85\text{-}89^\circ\text{C}$ (insufficient), and $\geq 90^\circ\text{C}$ (poor). The miniature protection can disconnect the load when the imbalance value is 25.92% and the temperature reaches 90°C . Monitoring data is stored in a logger and can be downloaded. Thus, this tool can enhance reliability and help PLN personnel work more effectively.

Keywords: Neutral Current, Unbalanced Load, Body Temperatur, Telegram

1. Pendahuluan

PT. PLN memenuhi kebutuhan listrik untuk 82,5 juta pelanggan di seluruh negeri [1]. Sistem listrik terdiri dari sistem pembangkitan, transmisi, distribusi, dan beban yang saling terhubung dan membentuk satu kesatuan [2]. Dalam sistem distribusi listrik, transformator distribusi berperan penting dalam mengkonversi tegangan dari 20 kV menjadi 380 V dan 220 V untuk pelanggan satu fasa, yang kemudian disalurkan kepada pengguna akhir [3].

Pemintaan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan kemajuan teknologi. Dalam upaya memenuhi kebutuhan listrik tersebut, distribusi beban yang awalnya seimbang akan terjadi ketidakseimbangan karena perbedaan waktu penggunaan beban [4]. Dalam proses distribusi sistem tenaga listrik, ketidakseimbangan beban adalah kejadian umum. Ketidakseimbangan dipicu oleh perbedaan penggunaan listrik di antara konsumen dan penempatan beban yang tidak merata pada fase R, S, dan T [5]. Pada transformator distribusi yang mengalami ketidakseimbangan beban, hal ini akan menghasilkan aliran arus di netral transformator dan naiknya suhu bodi [6], [7]. Pada masa ini proses pemerataan beban cukup sulit dilakukan secara kontinyu dan berkala, tingginya gangguan akibat beban yang tidak seimbang dapat menyebabkan pemadaman aliran listrik dan dalam jangka panjang akan mengurangi *lifetime* transformator [8].

Beberapa penelitian telah mencoba menganalisa ketidakseimbangan beban berdasarkan Edaran Direksi PT PLN Nomor: 0017.E/DIR/2014 (dikategorikan baik jika $<10\%$). Misalkan Syukri et al. menganalisa pembebanan transformator distribusi 20 kV pada penyulang LS5 gardu LSA 249 menggunakan metode pengukuran langsung ke lapangan dengan menggunakan *clamp meter* dan *earth tester*, dengan hasil nilai ketidakseimbangan beban $<10\%$ yaitu terjadi ketiga pagi hari 15 %, siang hari 26 %, dan malam hari 22% [9]. Ahmad et al. menganalisa ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi di PT. PLN (persero) rayon Cepu menggunakan metode pengukuran langsung ke lapangan, dengan hasil besarnya rata-rata ketidakseimbangan beban pada jam 11.00-16.00 WIB selama satu bulan yaitu 24,60%. Dengan hasil nilai rata-rata ketidakseimbangan beban pada beban puncak jam 17.00-22.00 WIB yaitu 11,39% [10]. Sya'roni et al. menganalisa ketidakseimbangan beban transformator distribusi 20kV dan solusinya pada jaringan tegangan rendah dengan

menggunakan software ETAP 12.6.0, dengan hasil presentase Ketidakseimbangan beban transformator dengan kode BE 1192 ketidakseimbangan beban mencapai 25.6 % [11]. Rohmat dan Riyadi, menganalisa ketidakseimbangan beban transformator distribusi di PT PLN (Persero) UPDL Pandaan dengan menggunakan metode pengukuran langsung ke lapangan. Dengan hasil, ketidakseimbangan beban di Gardu UPDL Pandaan pap beban puncak bernilai 37,66% yang selanjutnya disarankan untuk mengatur beban listrik akan meminimalisir kondisi ketidakseimbangan dan dampak rugi daya akibat arus netral [12]. Dari beberapa Analisa ini diketahui bahwa nilai ketidakseimbangan beban $>10\%$.

Adapun upaya personel PT PLN dalam melaksanakan pemeliharaan hingga kini adalah melakukan inspeksi langsung sebanyak tiga kali pada setiap transformator di lapangan. Proses ini tentu memakan waktu karena jumlah transformator yang signifikan tersebar di berbagai lokasi [7]. Oleh karena itu, penelitian ini merancang miniatur proteksi berskala laboratorium untuk memudahkan kerja personel, meningkatkan *lifetime* dan efisiensi waktu PT PLN dalam memonitor transformator distribusi apabila mengalami gangguan. Miniatur ini mengklasifikasikan gangguan dari dua parameter yaitu arus netral dan suhu bodi transformator. Standart arus netral mengacu pada Edaran Direksi PT. PLN Nomor: 0017.E/DIR/2014 diketahui bahwa indikator kesehatan untuk persentase arus netral (TR) diklasifikasikan ke dalam empat kategori: sangat baik ($<10\%$), baik ($10\%\text{-}<15\%$), cukup ($15\%\text{-}<20\%$), dan buruk ($\geq 20\%$). Standart suhu bodi mengacu pada Edaran Direksi PT. PLN Nomor: 0017.E/DIR/2014 diketahui bahwa indikator kesehatan untuk suhu badan transformator diklasifikasikan ke dalam empat kategori: sangat baik ($T < 83^\circ\text{C}$), baik ($83 \leq T < 85^\circ\text{C}$), cukup ($85 \leq T < 90^\circ\text{C}$), dan buruk ($T \geq 90^\circ\text{C}$).

2. Metode

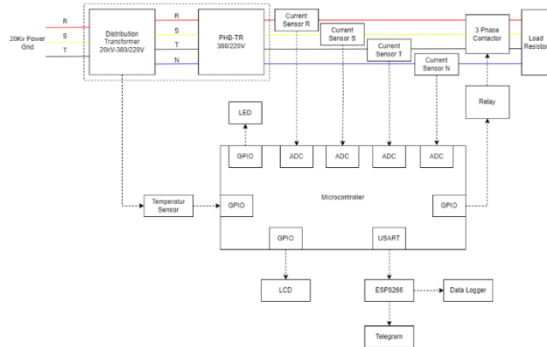
2.1 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk merancang perangkat proteksi skala laboratorium dengan judul "Proteksi Arus dan Suhu Trafo Distribusi Berbasis IoT Dampak Beban Tidak Seimbang". Perancangan perangkat ini telah disimulasikan terlebih dahulu pada software MATLAB Simulink untuk mengetahui apakah perencanaan perangkat sesuai dengan target yang ditentukan. Pengambilan data meliputi nilai arus fasa R, S, T, N dan suhu bodi

*Korespondensi: rafiipratama123@gmail.com

a) Prodi Teknik Elektro Industri, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jl. Raya ITS, Keputih, Sukolilo, Surabaya, Indonesia

transmormator. Penentuan kategori gangguan di dapatkan dengan membandingkan nilai parameter dengan standart pada Edaran Direksi PT. PLN Nomor: 0017.E/DIR/2014. Konsep dari parancangan perangkat proteksi meliputi input, proses, dan output seperti dapat dilihat di Gambar 2.1. Pada blok diagram Gambar 2.1 terdapat Gardu Trafo Tiang (GTT) yang terdiri dari dua komponen utama yaitu trafo distribusi dan PHB-TR. Dalam perencanaan ini penulis merancang perangkat proteksi berskala laboratorium sehingga untuk menggantikan GTT tersebut penulis menggunakan modul Jaringan Tegangan Menengah (JTM). Modul JTM ini terdiri dari 3 buah transformator non CT yang dirangkai secara delta-wye. Spesifikasi dari modul JTM ini adalah 220V_(LL)/20V_(In) (*step down*). Tegangan input 220V_(LL) modul JTM diperoleh dari variac 3 fasa. Selanjutnya untuk menggantikan beban pelanggan, penulis menggunakan resistor *load* sebanyak 3 buah yang dirangkai secara wye terhadap output modul JTM.



GAMBAR 2.1 BLOK DIAGRAM SISTEM

Perangkat proteksi ini dilengkapi dengan komponen sebagai berikut, 4 buah sensor SCT-013-030, 3 buah sensor suhu DS18B20, 1 buah kontaktor 3 fasa, 1 buah relay, 1 buah led indikator, 1 buah ESP8266, 1 buah mikrokontroler STM32F407VG, dan 1 buah LCD 20x4. Sensor arus dipasang pada fasa R, S, T, dan N yang berfungsi untuk membaca nilai arus yang mengalir pada masing-masing kabel fasa tersebut. Sensor akan dihubungkan ke pin ADC mikrokontroler dan diberi tegangan referensi. ADC ini akan dikonfigurasi untuk mengubah sinyal analog sensor menjadi sinyal digital. Sensor Suhu dipasang pada ketiga *body transformer* yang berfungsi untuk membaca nilai suhu pada *body transformer*. Sensor suhu ini dihubungkan pada salah satu pin digital mikrokontroler menggunakan protokol komunikasi 1-Wire yang memungkinkan beberapa sensor untuk terhubung dalam satu jalur data. Data digital dari arus dan suhu akan diolah oleh mikrokontroler dan ditampilkan pada layer LCD. Perangkat miniatur ini terintegrasi dengan aplikasi telegram dan data logger yang memanfaatkan komunisi serial USART dan ESP8266. Melalui koneksi ini, ESP8266 dapat mengirimkan data yang diterima ke bot Telegram menggunakan API bot sekaligus menyimpan data yang diterima dalam logger database. Relay yang terhubung pada kontaktor berfungsi sebagai pengendali untuk mengoperasikan kontaktor. Ketika dalam kondisi tanpa gangguan, kumparan pada relay akan dialiri arus listrik, menghasilkan medan magnet sehingga posisi kontak dari menjadi tertutup. Kontak relay yang tertutup mengalirkan arus ke kumparan kontaktor sehingga kontak utama kontaktor terhubung dan memungkinkan arus listrik mengalir ke beban. Apabila dalam kondisi gangguan, mikrokontroler akan menghentikan sinyal kontrol ke relay sehingga kumparan pada relay tidak dialiri arus listrik. Hal ini membuat kontaktor kehilangan *supply* dan beban akan terputus.

Perangkat proteksi akan bekerja dengan cara memutus beban apabila terdeteksi nilai arus netral dan nilai suhu yang melebihi standart mengacu pada Edaran Direksi PT PLN Nomor:0017.E/DIR/2014. Untuk membuat kondisi gangguan arus netral secara signifikan maka nilai resistansi pada salah satu resistor load dibuat berbeda sedangkan keduanya dibuat sama. Untuk membuat kondisi gangguan suhu yang naik secara signifikan maka sensor suhu akan dipanaskan menggunakan heater. Data arus dan suhu yang telah diproses oleh mikrokontroler akan dibandingkan dengan nilai standart. Apabila nilai arus dan suhu tersebut memenuhi klasifikasi tertentu maka akan muncul notifikasi pada telegram. Selanjutnya, perangkat proteksi akan bekerja memutus beban jika nilai arus dan suhu tersebut memenuhi klasifikasi tertentu. Pembacaan data oleh sensor akan ditampilkan secara *realtime* pada LCD dan tersimpan di logger untuk mengetahui *record* nilai arus dan suhu dalam rentang waktu tertentu.

2.2 Kenaikan Suhu Transformator

Peningkatan suhu yang terjadi di gulungan transformator karena panas biasanya disebabkan oleh beban. Faktor ini muncul karena adanya arus dalam gulungan dan proses induksi besi [7]. Evaluasi dapat dilakukan untuk mengetahui apakah trafo masih dapat beroperasi secara optimal, dan jika terdapat indikasi kerusakan yang segera terjadi, tindakan perbaikan atau pemeliharaan seperti penggantian trafo, penambahan trafo sisipan, atau rekondisi/rekonstruksi trafo mungkin diperlukan sebelum trafo mengalami kerusakan atau kegagalan operasional [13]. Bentuk tabel tipikal *health index online assessment tier-2* pada trafo distribusi ditunjukkan pada Tabel 2.1 di bawah ini.

TABEL 2.1 TEMPERATURE HEALTH INDEX

Item Diagnosa	Baik	Cukup	Kurang	Buruk
Body trafo	< 83	83 - 84	85 - 89	T ≥ 90

2.3 Ketidakseimbangan Arus Beban

Definisi keadaan seimbang adalah suatu keadaan ketika: a) ketiga vektor arus/tegangan sama besar, atau b) ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain. Sementara itu, ketidakseimbangan merujuk pada situasi di mana setidaknya satu dari dua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi [14]. [15]. Nilai ketidakseimbangan arus beban dan arus netral dapat diklasifikasikan menurut prosentasenya, tipikal *health index online assesment tier-1* pada trafo distribusi dapat dilihat pada Tabel 2.2 di bawah ini.

TABEL 2.2 PARAMETER INDEX KETIDAKSEIMBANGAN ARUS BEBAN DAN ARUS NETRAL

Karakteristik	Baik	Cukup	Kurang	Buruk
Ketidakseimbangan Arus Beban (%)	< 10%	10% - 19%	20% - 24%	≥25%
Arus Netral (%)	< 10%	10% - 14%	15% - 19%	≥20%

Persamaan (2-1) samapai Persamaan (2-4) berikut ini adalah rumus untuk menghitung % ketidakseimbangan arus beban.

$$I_{rt} = \frac{IR + IS + IT}{3} \quad (2-1)$$

$$I_r = \frac{IR}{I_{rt}} \quad (2-2)$$

$$I_s = \frac{IS}{I_{rt}} \quad (2-3)$$

$$I_t = \frac{IT}{I_{rt}} \quad (2-4)$$

Pada keadaan seimbang besarnya koefisien antara I_r , I_s , I_t adalah 1. Dengan demikian, rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) dapat dirumuskan seperti di Persamaan (2-5).

$$I_{unb} = \frac{|I_r - 1| + |I_s - 1| + |I_t - 1|}{3} \times 100\% \quad (2-5)$$

Keterangan: I_{rt} = Irata-rata (A); I_r = Perbandingan I fasa r dengan Irata-rata (A), $I_R = I$ fasa r (A), I_s = Perbandingan I fasa s dengan Irata-rata (A), $I_S = I$ fasa s (A), I_t = Perbandingan I fasa t dengan Irata-rata (A), $I_T = I$ fasa t (A), I_{unb} = Ketidakseimbangan arus beban (%).

3. Hasil dan Pembahasan

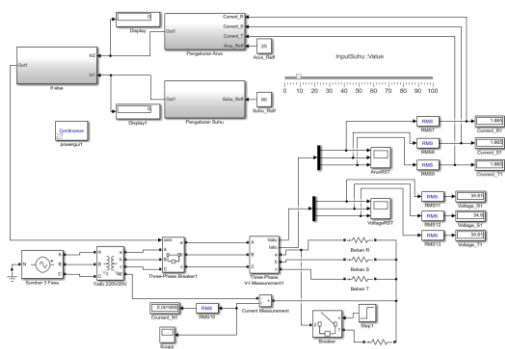
3.1 Simulasi Sistem

Pengujian simulasi ini dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB Simulink bertujuan untuk mengetahui apakah rancangan perangkat proteksi sesuai dengan target. Target yang diharapkan dari simulasi ini adalah sistem dapat memutus beban apabila terdeteksi gangguan arus netral dan kenaikan suhu sesuai dengan standar pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2.

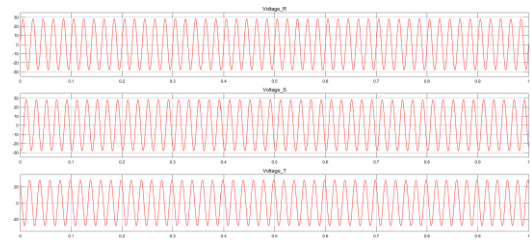
Simulasi pada Gambar 3.1 menggunakan parameter arus dan suhu. Parameter ini akan di proses dalam blok perbandingan. Di dalam blok perbandingan ini nilai parameter akan dibandingkan terhadap nilai standart dengan menggunakan metode *if-else*. Hasil dari perbandingan ini akan menghasilkan nilai 1 atau 0 yang akan digunakan sebagai input *three phase breaker*. Apabila *three phase breaker* menerima nilai 1 maka beban tersambung (tanpa gangguan) sedangkan jika menerima nilai 0 maka beban akan terputus (gangguan). Pada Gambar 3.2 diketahui nilai tegangan ketika tidak ada gangguan sehingga gelombang masih tampak hingga $t=1$. Pada Gambar 3.3 diketahui nilai tegangan ketika terdapat gangguan sehingga gelombang bernilai 0 pada $t=0,8$.

3.2 Pengujian Parsial Sensor Suhu DS18B20

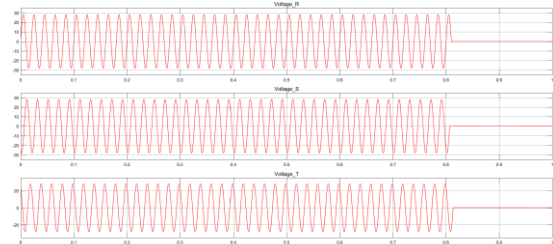
Pengujian akurasi sensor temperatur DS18B20 dilakukan dengan cara membandingkan hasil pembacaan sensor dengan pembacaan alat ukur suhu HTC-2. Pengujian dilakukan dengan menggunakan heater yang diisi air. Hasil pengujian seperti pada Tabel 3.1.



GAMBAR 3.1 SISTEM INTEGRASI SIMULASI MATLAB



GAMBAR 3.2 GRAFIK TEGANGAN SAAT TIDAK TERJADI GANGGUAN



GAMBAR 3.3 GRAFIK TEGANGAN SAAT TERJADI GANGGUAN

TABEL 3.1 HASIL PENGUJIAN SUHU MENGGUNAKAN DS18B20 DAN THERMOMETER HTC-2

Fasa	DS18B20 (°C)	Thermometers (°C)	Rata-rata Error (%)
Fasa R	31,6	31,5	0,36
	58,1	57,8	
	78,1	78,1	
	83,6	83,1	
	99	98,1	
Fasa S	31,1	31,5	0,3
	58,2	57,8	
	78	78,1	
	88,8	88,3	
	98	98,1	
Fasa T	31,1	31,5	0,5
	58,9	57,8	
	78	78,1	
	88,4	88,3	
	97,3	98,1	

Pada Tabel 3.1 dapat dilihat perbandingan pembacaan suhu sensor DS18B20 dengan Thermometer HTC-2. Misalkan pada phase R, pembacaan dari sensor DS18B20 adalah 31,6°C sedangkan pembacaan suhu oleh thermometer adalah 31,5°C. Dengan membandingkan data pembacaan suhu dari kedua perangkat tersebut, kita dapat mengevaluasi sejauh mana keakuratan sensor suhu DS18B20 dalam mengukur suhu jika dibandingkan dengan hasil pengukuran thermometer HTC-2. Error perbandingan pembacaan suhu oleh DS18B20 dan thermometer HTC-2 yaitu 0,36% fasa R, 0,3% fasa S, dan 0,5% fasa T.

3.3 Pengujian Parsial Sensor Arus SCT-013

Pengujian akurasi sensor arus SCT-013 dilakukan untuk mendapatkan tingkat akurasi pembacaan arus sebaik mungkin. Sensor arus yang digunakan sebanyak 4 buah sensor yang akan digunakan untuk membaca arus pada fasa R, S, T, dan N. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan variac sebagai supply tegangan dan resistor geser sebagai beban. Pembacaan dari sensor arus SCT - 013 akan dibandingkan dengan pembacaan dari tang ampere dengan hasil seperti pada Tabel. 3.2. Terlihat bahwa pembacaan dari sensor arus SCT-013 cenderung naik seiring dengan naiknya pembacaan dari alat ukur tang ampere. Namun akurasi pembacaan dari sensor arus ini tidak sama persis

dengan pembacaan dari tang ampere, untuk nilai eror yang dihasilkan dari pembacaan sensor arus terhadap tang ampere yaitu fasa R 1,23%, fasa S 1,36%, fasa T 2,57%, dan fasa N 2,57%.

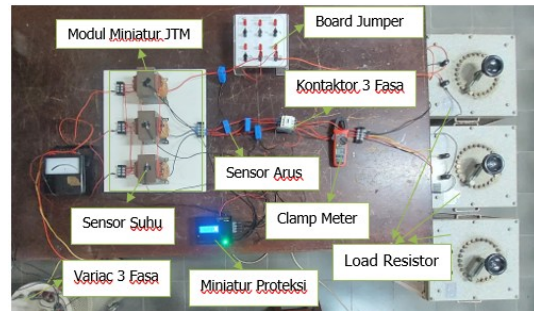
TABEL 3.2 HASIL PENGUJIAN ARUS MENGGUNAKAN SENSOR ARUS SCT-013 DAN CLAMP METER

Clamp Meter (A)	Sensor Arus (A)			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa N
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,2	0,18	0,18	0,18	0,18
0,4	0,38	0,37	0,37	0,38
0,6	0,58	0,58	0,58	0,58
0,8	0,78	0,78	0,78	0,78
1,0	0,97	0,97	0,97	0,97
1,2	1,19	1,19	1,19	1,19
1,4	1,38	1,38	1,38	1,38
1,6	1,58	1,58	1,58	1,58
1,8	1,77	1,77	1,77	1,77
2,0	1,96	1,96	1,96	1,96
2,2	2,16	2,16	2,16	2,16
2,4	2,38	2,36	2,36	2,38
2,6	2,57	2,57	2,57	2,57
2,8	2,77	2,77	2,77	2,77
3,0	2,99	2,98	2,98	2,99
Error rata-rata (%)	1,23	1,36	1,10	1,16

3.4 Pengujian Hasil Integrasi Hardware

Pengujian integrasi dengan rangkaian uji seperti pada Gambar 3.4 dilakukan dalam skala laboratorium untuk mengetahui proteksi dapat bekerja dengan baik terhadap gangguan arus netral dan kenaikan suhu pada transformator distribusi. Pengujian dilakukan dengan menggunakan modul JTM dan 3 buah resistor load 300W. Untuk validasi pembacaan sensor, digunakan tang ampere dan thermometer gun sebagai pembanding. Dari hasil uji integrasi ini diketahui bahwa perangkat proteksi mampu memutus beban apabila terdeteksi gangguan. pengujian dilakukan secara bergantian terhadap fasa R, S, dan T. Pihak personel pemeliharaan dapat memonitor gangguan melalui *software* Telegram dan data logger yang sudah terintegrasi dengan perangkat proteksi. Saat pembacaan sensor mencapai kategori tertentu akan otomatis mengirimkan pesan ke Telegram dan dapat dipantau secara *real-time*. Hal ini akan memudahkan personel untuk memonitor tanpa harus berada di lokasi dan menerima aduan pelanggan.

Tabel 3.3 menunjukkan hasil pengujian integrasi saat diberikan gangguan pada fasa R. Pengujian dilakukan dengan mengubah-ubah nilai beban fasa R. Proteksi akan bekerja apabila nilai ketidakseimbangan arus beban $\geq 25\%$ yaitu dengan memutus beban. Pada data baris ke-6 presentase ketidakseimbangan arus beban dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-1) s.d Persamaan (2-5) dengan hasil sebagai berikut: $I_{rt} = 2,16$ A, $I_r = 0,388$ A, $I_s = 0,199$ A, $I_t = 0,199$ A, dan $I_{unb} = 25,92\%$. Pada Tabel 3.3 baris ke-6 diperoleh nilai I_{unb} sebesar 25,92%. Alat akan mendeteksi adanya gangguan saat nilai ketidakseimbangan arus beban $\geq 25\%$, sehingga respon yang diberikan alat telah sesuai yaitu dengan memutus beban (trip) sebagai upaya proteksi.



GAMBAR 3.4 PENGUJIAN INTEGRASI HARDWARE

TABEL 3.3 HASIL PENGUJIAN KETIDAKSEIMBANGAN ARUS DENGAN GANGGUAN PADA FASA R

No	Beban (Ω)			Sensor Arus (A)				Aksi
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa N	
1.	12	12	12	1,74	1,74	1,74	0,00	-
2.	10,6	12	12	1,95	1,74	1,74	0,20	-
3.	9,6	12	12	2,15	1,74	1,74	0,41	-
4.	8,9	12	12	2,44	1,74	1,74	0,70	Notifikasi "cukup"
5.	7,7	12	12	2,78	1,74	1,74	1,04	Notifikasi "kurang"
6.	7,2	12	12	3,00	1,74	1,74	1,26	Notifikasi "buruk", Trip

Tabel 3.4 menunjukkan hasil pengujian integrasi saat diberikan gangguan pada fasa S. Pengujian dilakukan dengan mengubah-ubah nilai beban fasa S. Proteksi akan bekerja apabila nilai ketidakseimbangan arus beban $\geq 25\%$ yaitu dengan memutus beban. Pada data baris ke-6 presentase ketidakseimbangan arus beban dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-1) s.d Persamaan (2-5) dengan hasil sebagai berikut: $I_{rt} = 2,16$ A, $I_r = 0,199$ A, $I_s = 0,388$ A, $I_t = 0,199$ A, dan $I_{unb} = 25,92\%$. Pada Tabel 3.4 baris ke-6 diperoleh nilai I_{unb} sebesar 25,92%. Alat akan mendeteksi adanya gangguan saat nilai ketidakseimbangan arus beban $\geq 25\%$, sehingga respon yang diberikan alat telah sesuai yaitu dengan memutus beban (trip) sebagai upaya proteksi.

TABEL 3.4 HASIL PENGUJIAN KETIDAKSEIMBANGAN ARUS DENGAN GANGGUAN PADA FASA S

No	Beban (Ω)			Sensor Arus (A)				Aksi
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa N	
1.	12	12	12	1,74	1,74	1,74	0,00	-
2.	12	10,6	12	1,74	1,95	1,74	0,20	-
3.	12	9,6	12	1,74	2,15	1,74	0,41	-
4.	12	8,9	12	1,74	2,44	1,74	0,70	Notifikasi "cukup"
5.	12	7,7	12	1,74	2,78	1,74	1,04	Notifikasi "kurang"
6.	12	7,2	12	1,74	3,00	1,74	1,26	Notifikasi "buruk", Trip

Tabel 3.5 menunjukkan hasil pengujian integrasi saat diberikan gangguan pada fasa T. Pengujian dilakukan dengan mengubah-ubah nilai beban fasa T. Proteksi akan bekerja apabila nilai ketidakseimbangan arus beban $\geq 25\%$ yaitu dengan memutus beban. Pada data baris ke-6 presentase ketidakseimbangan arus beban dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-1) sampai dengan Persamaan (2-5) dengan hasil sebagai berikut: $I_{rt} = 2,16$ A, $I_r = 0,199$ A, $I_s = 0,199$ A, $I_t = 0,388$ A, dan $I_{unb} = 25,92\%$.

Pada Tabel 3.5 baris ke-6 diperoleh nilai lumb sebesar 25,92%. Alat akan mendeteksi adanya gangguan saat nilai ketidakseimbangan arus beban $\geq 25\%$, sehingga respon yang diberikan alat telah sesuai yaitu dengan memutus beban (trip) sebagai upaya proteksi.

TABEL 3.5 HASIL PENGUKURAN KETIDAKSEIMBANGAN ARUS DENGAN GANGGUAN PADA FASA T

No	Beban (Ω)			Sensor Arus (A)				Aksi
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa N	
1.	12	12	12	1,74	1,74	1,74	0,00	-
2.	12	12	10,6	1,74	1,74	1,95	0,20	-
3.	12	12	9,6	1,74	1,74	2,15	0,41	-
4.	12	12	8,9	1,74	1,74	2,44	0,70	Notifikasi "cukup"
5.	12	12	7,7	1,74	1,74	2,78	1,04	Notifikasi "kurang"
6.	12	12	7,2	1,74	1,74	3,00	1,26	Notifikasi "buruk", Trip

Pengujian integrasi hardware dengan gangguan kenaikan suhu dilakukan dengan menggunakan modul gangguan suhu. Modul gangguan suhu terdiri *heater* dan *dimmer*. *Dimmer* pada modul gangguan suhu ini berfungsi sebagai pengontrol suhu. Secara perlahan suhu akan dinaikan dengan mengatur selektor pada *dimmer*.

Tabel 3.6 merupakan hasil pengujian integrasi dengan gangguan suhu pada fasa R. Pengujian dilakukan dengan cara menempelkan sensor suhu pada plat *heater*. Sistem akan memberikan notifikasi saat suhu sebesar 83°C dan 85°C . Sistem akan memproteksi (trip) suhu telah mencapai 90°C . Dari hasil pengujian di atas, notifikasi terkirim saat pembacaan sensor suhu $83,0^{\circ}\text{C}$ dan $85,3^{\circ}\text{C}$. Selanjutnya proteksi (trip) bekerja saat pembacaan sensor suhu $90,3^{\circ}\text{C}$.

TABEL 3.6 HASIL PENGUJIAN GANGGUAN KENAikan SUHU PADA FASA R

No	Sensor Suhu ($^{\circ}\text{C}$)			Aksi
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
1.	34,8	34,5	35,6	-
2.	34,8	34,5	35,6	-
3.	34,8	34,5	35,6	-
4.	34,8	34,5	35,6	-
5.	34,8	34,5	35,6	-
6.	34,8	34,5	35,6	-
7.	34,8	34,5	35,6	-
8.	34,8	34,5	35,6	-
9.	34,8	34,5	35,6	Notifikasi "cukup"
10.	34,8	34,5	35,6	Notifikasi "kurang"
11.	34,8	34,5	35,6	Notifikasi "buruk", Trip

Tabel 3.7 merupakan hasil pengujian integrasi dengan gangguan suhu pada fasa S. Pengujian dilakukan dengan cara menempelkan sensor suhu pada plat *heater*. Sistem akan memberikan notifikasi saat suhu sebesar 83°C dan 85°C . Sistem akan memproteksi (trip) suhu telah mencapai 90°C . Dari hasil pengujian di atas, notifikasi terkirim saat pembacaan sensor suhu $83,0^{\circ}\text{C}$ dan $85,1^{\circ}\text{C}$. Selanjutnya proteksi (trip) bekerja saat pembacaan sensor suhu $90,0^{\circ}\text{C}$.

TABEL 3.7 HASIL PENGUJIAN GANGGUAN KENAikan SUHU PADA FASA S

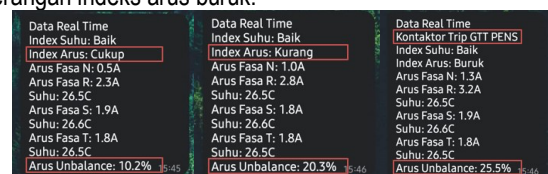
No	Sensor Suhu ($^{\circ}\text{C}$)			Aksi
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
1.	34,8	34,5	35,6	-
2.	35,1	35,0	35,6	-
3.	37,2	37,4	35,6	-
4.	42,3	41,6	35,6	-
5.	58,6	57,4	35,6	-
6.	63,0	62,5	35,6	-
7.	63,1	62,6	35,6	-
8.	66,5	68,5	35,6	-
9.	83,0	83,0	35,6	Notifikasi "cukup"
10.	85,3	85,1	35,6	Notifikasi "kurang"
11.	90,3	90,0	35,6	Notifikasi "buruk", Trip

Tabel 3.8 merupakan pengujian integrasi dengan gangguan suhu pada fasa T. Pengujian dilakukan dengan cara menempelkan sensor suhu pada plat *heater*. Sistem akan memberikan notifikasi saat suhu sebesar 83°C dan 85°C . Sistem akan memproteksi (trip) suhu telah mencapai 90°C . Dari hasil pengujian di atas, notifikasi terkirim saat pembacaan sensor suhu $83,0^{\circ}\text{C}$ dan $85,1^{\circ}\text{C}$. Selanjutnya proteksi (trip) bekerja saat pembacaan sensor suhu $90,0^{\circ}\text{C}$.

TABEL 3.8 HASIL PENGUJIAN GANGGUAN KENAikan SUHU PADA FASA T

No	Sensor Suhu ($^{\circ}\text{C}$)			Aksi
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
1.	34,8	34,5	35,6	-
2.	34,8	34,5	36,5	-
3.	34,8	34,5	40,5	-
4.	34,8	34,5	45,5	-
5.	34,8	34,5	56,3	-
6.	34,8	34,5	62,0	-
7.	34,8	34,5	62,0	-
8.	34,8	34,5	71,4	-
9.	34,8	34,5	83,0	Notifikasi "cukup"
10.	34,8	34,5	85,1	Notifikasi "kurang"
11.	34,8	34,5	90,0	Notifikasi "buruk", Trip

Pada Gambar 3.5 terdapat contoh notifikasi pada Telegram saat diberi gangguan ketidakseimbangan arus pada fasa R. Saat alat mendeteksi ketidakseimbangan arus sebesar 10,2% maka alat akan mengirim notifikasi ke telegram dengan keterangan indeks arus cukup. Selanjutnya saat alat mendeteksi ketidakseimbangan arus sebesar 20,3% maka alat akan mengirim notifikasi dengan keterangan index arus kurang, saat ketidakseimbangan arus yang terdeteksi $\geq 25\%$ maka alat akan mengirim notifikasi dengan keterangan indeks arus buruk.



GAMBAR 3.5 TAMPILAN NOTIFIKASI PADA TELEGRAM

Gambar 3.6 merupakan tampilan *data logger* yang menyimpan data hasil monitoring arus dan suhu pada setiap fasa serta status gangguan. Data akan tercatat setiap ada perubahan pembacaan dari sensor arus dan suhu. Apabila sistem tidak mendeteksi gangguan maka status yang akan tercatat yaitu "Normal" apabila sistem mendeteksi adanya gangguan maka status yang tercatat yaitu "Trip". Pada data Baris ke-1 terlihat bahwa nilai suhu pada fasa R sudah mencapai nilai standart kenaikan suhu yaitu 90,0°C. Sehingga sistem mengidentifikasi sebagai gangguan, respon dari sistem ini adalah trip atau memutus beban.

No	Tanggal & Waktu	Arus	Suhu	Status
1	2024-05-10 08:00:00	1.2 A	90.0 °C	Trip
2	2024-05-10 08:00:05	1.2 A	89.5 °C	Normal
3	2024-05-10 08:00:10	1.2 A	89.0 °C	Normal
4	2024-05-10 08:00:15	1.2 A	88.5 °C	Normal
5	2024-05-10 08:00:20	1.2 A	88.0 °C	Normal
6	2024-05-10 08:00:25	1.2 A	87.5 °C	Normal
7	2024-05-10 08:00:30	1.2 A	87.0 °C	Normal
8	2024-05-10 08:00:35	1.2 A	86.5 °C	Normal
9	2024-05-10 08:00:40	1.2 A	86.0 °C	Normal
10	2024-05-10 08:00:45	1.2 A	85.5 °C	Normal

GAMBAR 3. 6 TAMPILAN DATA LOGGER

4. Kesimpulan

Perancangan miniatur proteksi arus netral dan suhu bodi trafo distribusi dampak ketidakseimbangan beban berbasis IoT dapat bekerja dengan baik. Dari hasil pengujian diketahui bahwa miniatur proteksi mampu mengidentifikasi gangguan ketidakseimbangan arus dan gangguan kenaikan suhu serta memberikan respon proteksi memutus beban sesuai dengan standart. Standart ketidakseimbangan arus yang tidak diperbolehkan yaitu $\geq 25\%$, miniatur proteksi mampu memutus beban saat gangguan ketidakseimbangan arus sebesar 25,92% dengan gangguan diberikan pada fasa R, S, dan T secara bergantian. Standart kenaikan suhu yang tidak diperbolehkan yaitu $\geq 90^{\circ}\text{C}$, miniatur proteksi mampu memutus beban saat gangguan kenaikan suhu pada fasa R sebesar $90,3^{\circ}\text{C}$, fasa S sebesar 90°C , dan fasa T sebesar 90°C . Karena perangkat proteksi ini berada dalam tahap uji laboratorium diharapkan kedepannya dapat dikembangkan agar perangkat dapat diaplikasikan dan di uji secara real ke lapangan.

Referensi

- [1] A. P. Purnomoadi, H. S. Purnomo, A. S. Habibie, N. E. Saputro, D. R. Jintaka, dan I. M. Sari, "A Review on Asset Health Management and Criticality Parameters in PLN Indonesia," dalam *A Preliminary Review on Asset Health Management and Criticality Parameters in PLN Indonesia*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ICPERE56870.2022.10037534.
- [2] M. D. T. Sogen, "ANALISIS PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP ARUS NETRAL DAN LOSSES PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DI PT PLN (PERSERO) AREA SORONG," *Jurnal Electro Lucent*, vol. 4, no. 1, hlm. 1–10, 2018.
- [3] A. B. Prayoga dan B. Suprianto, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Terhadap Rugi Daya (Losses) Dengan Digsilent Power Factory di PT. PLN (Persero) ULP Ngunt," *Jurnal Teknik Elektro.*, vol. 12, no. 02, hlm. 23–32, 2023.
- [4] H. Muchtar dan Y. Sopian, "STUDI VERIFIKASI SISTEM KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA JARINGAN TEGANGAN RENDAH MENGGUNAKAN ALAT PHB – SR (PERALATAN HUBUNG BAGI SAMBUNGAN RUMAH) DI WILAYAH PLN AREA CEMPAKA PUTIH," *elektum*, vol. 14, no. 1, hlm. 1, Apr 2017, doi: 10.24853/elektum.14.1.1-8.
- [5] R. A Duyo dan A. Sulkifli, "ANALISIS JARINGAN DAN PEMELIHARAAN PADA JARINGAN DISTRIBUSI DI PT.PLN WILAYAH CABANG PINRANG," *VERTEX ELEKTRO*, vol. 01, no. 02, hlm. 1–11, 2019.
- [6] S. Hidayat dkk., "PENYEIMBANGAN BEBAN PADA JARINGAN TEGANGAN RENDAH GARDU DISTRIBUSI CD 33 PENYULANG SAWAH DI PT PLN (PERSERO) AREA BINTARO," *Jurnal Sutej*, vol. 8, no. 1, hlm. 21–27, 2018.
- [7] G. F. A. Yudhistira, S. Sutedjo, dan R. Rakhmawati, "Distribution Transformer Secondary Bushing Temperature Detection Device using Feed Forward Neural Network," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 11, no. 4, hlm. 983–997, Okt 2023, doi: 10.26760/elkomika.v11i4.983.
- [8] S. Muhammad, Hamdani, dan Beni Satria, "Sistem Ketidak Seimbangan Beban Pada Jaringan Tegangan Rendah Menggunakan Alat PHB – SR (Peralatan Hubung Bagi Sambungan Rumah) Di PT. PLN Persero ULP Binjai Timur," *JurnalOrangElektro*, vol. 13, no. 2, 2024.
- [9] Syukri, T. M. Asyadi, Mauliadi, dan F. Moesnadi, "Analisa Pembebanan Transformator Distribusi 20 kV Pada Penyulang LS5 Gardu LSA 249," *JJEEE*, vol. 4, no. 2, Jul 2022.
- [10] A. Saiful Aprilian Ektianto, I. M. Agus Darwanto Sekolah Tinggi Teknologi Ronggolawe Cepu, dan P. Korespondensi, "ANALISIS KETIDAK SEIMBANGAN BEBAN PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI Di PT. PLN (Persero) RAYON CEPU," 2021.
- [11] Z. Sya'roni dan T. Rijanto, "ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 20 KV DAN SOLUSINYA PADA JARINGAN TEGANGAN RENDAH," *JurnalTeknikElektro*, vol. 08, no. 01, hlm. 173–180, 2019.
- [12] K. Rohmat dan M. Riyadi, "ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DI PT. PLN (PERSERO) UPDL PANDAAN," *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 25, no. 4, hlm. 186–192, Des 2023, doi: 10.14710/transmisi.25.4.186-192.
- [13] T. Setiawan, Syukri, dan Muliadi, "Kajian Pemeliharaan Trafo Distribusi Menggunakan Metode Codition Based Maintenance (CBM)," *Aceh Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 2, no. 2, hlm. 18–23, 2022.
- [14] Ruliyanto, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Arus Ground pada Trafo 1 dan Trafo 2 pada Beban Puncak Sesaat," *Jurnal Ilmiah GIGA*, vol. 23, no. 1, hlm. 27–34, 2020.
- [15] H. L. Latupeirissa, "PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP ARUS NETRAL DAN LOSSES DAYA PADA TRAFODISTRIBUSI GARDU KP-01 DESA HATIVE KECIL," *JURNAL SIMETRIK*, vol. 7, no. 2, hlm. 16–22, 2017.