

Pengukuran Level Pembebanan dan Ketakseimbangan untuk Transformator Gedung Fkip Unismuh Makassar

Syaharani Nurjannah¹ | Muhammad Alif Ar- Ramadhan¹ | Andi Faharuddin*² | Abdul Hafid²

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar, Indonesia.

syaharani.nurjannah1612@gmail.com
muhammadalif061102@gmail.com

² Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar, Indonesia.

afaharuddin@ymail.com
abdul.hafid@unismuh.co.id

Korespondensi

*Andi Faharuddin
afaharuddin@ymail.com

ABSTRAK: Ketersediaan energi listrik yang stabil dan andal sangat penting untuk mendukung aktivitas akademik di lingkungan perguruan tinggi. Salah satu permasalahan yang sering terjadi pada sistem distribusi listrik adalah ketakseimbangan pembebanan transformator, yang dapat menurunkan efisiensi dan memperpendek umur peralatan. Penelitian ini bertujuan untuk menilai level pembebanan dan tingkat ketakseimbangan pada transformator distribusi Kampus Universitas Muhammadiyah Makassar. Metode penelitian dilakukan melalui pengukuran arus dan tegangan pada setiap fase serta pemodelan sistem menggunakan perangkat lunak PSCAD untuk memperoleh gambaran kondisi operasional transformator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat pembebanan transformator berada pada kisaran 60–80% dari kapasitas nominal, sedangkan nilai ketakseimbangan beban mengalami fluktuasi namun masih berada dalam batas toleransi standar SPLN No. 17 Tahun 2014. Kesimpulan penelitian ini menunjukkan bahwa transformator masih beroperasi dalam kondisi cukup aman. Implikasi dari penelitian ini adalah perlunya pemantauan dan penyeimbangan beban secara berkala guna meningkatkan efisiensi sistem dan keandalan pasokan listrik kampus.

KATA KUNCI

Transformator distribusi, pembebanan, ketakseimbangan beban

ABSTRACT: The availability of stable and reliable electrical energy is essential to support academic activities in higher education institutions. One common issue in electrical distribution systems is load imbalance in distribution transformers, which can reduce efficiency and shorten equipment lifespan. This study aims to assess the loading level and load imbalance of a distribution transformer at the Universitas Muhammadiyah Makassar campus. The research method involved direct measurements of current and voltage on each phase, combined with system modeling using PSCAD software to represent the transformer's operational conditions. The results indicate that the transformer loading level ranges between 60–80% of its nominal capacity, while load imbalance values fluctuate but remain within the allowable limits specified by SPLN No. 17 of 2014. The study concludes that the transformer operates under acceptable conditions. The implication of this research highlights the importance of regular load monitoring and phase load balancing to improve system efficiency, maintain transformer reliability, and ensure continuous electrical supply for campus activities

Indonesia.

Keywords:

Distribution transformer, loading level, load imbalance.

1 | PENDAHULUAN

Dalam era modern ini, kebutuhan akan penyediaan energi listrik yang andal dan efisien semakin meningkat, terutama di lingkungan pendidikan seperti, Unismuh Makassar. Ketersediaan listrik yang stabil sangat penting untuk mendukung berbagai kegiatan akademik dan non – akademik, termasuk proses belajar – mengajar, penelitian, dan kegiatan administrasi. Salah satu komponen vital dalam sistem distribusi tenaga listrik adalah Transformator, yang berfungsi untuk mengubah level tegangan sesuai dengan kebutuhan beban.

Namun dalam praktiknya, sering kali terjadi ketakseimbangan beban yang dapat memengaruhi kinerja Transformator. Ketakseimbangan beban ini dapat disebabkan oleh distribusi beban yang tidak merata antara setiap Fase, serta fluktuasi permintaan energi yang bervariasi sepanjang waktu. Ketakseimbangan ini dapat mempengaruhi peningkatan suhu, penurunan efisiensi, dan bahkan kerusakan pada Transformator. Level Ketakseimbangan yang ditoleransi atau yang dapat diterima oleh PLN kurang dari 10% dikategorikan baik dan 10 s.d < 20% dikategorikan cukup (Siboro et al.,2024). Demikian pula, level pembebahan Transformator Distribusi yang bisa diterima oleh PLN adalah kurang dari 60% itu dikategorikan baik dan 60 s.d < 80% dikategorikan cukup. (Siboro et al.,2024).

Transformator Distribusi memiliki peran penting dalam sistem tenaga listrik karena berfungsi untuk menurunkan tegangan dari jaringan distribusi menengah (umumnya 20 kV) menjadi tegangan rendah (220/380 V) yang dapat digunakan oleh konsumen. Keandalan dan kualitas daya yang dihasilkan oleh Transformator Distribusi sangat berpengaruh terhadap kontinuitas pasokan listrik, terutama di kawasan dengan beban yang bervariasi seperti dilingkungan perguruan tinggi. Universitas Muhammadiyah Makassar (Unismuh Makassar) merupakan salah satu institusi pendidikan yang memiliki beban listrik cukup besar dan beragam, meliputi ruang perkuliahan, laboratorium, perkantoran, fasilitas umum, dan infrastruktur pendukung lainnya.

Salah satu tantangan yang sering dihadapi dalam pengoperasian Transformator Distribusi adalah ketakseimbangan pembebahan antar Fase (Load Unbalance). Ketakseimbangan ini terjadi ketika data atau arus yang mengalir pada masing – masing Fase tidak sama, sehingga mengakibatkan timbulnya arus netral yang tinggi, peningkatan rugi -rugi daya, pemanasan berlebih pada belitan Transformator, dan pada jangka panjang dapat mengurangi umur pakai peralatan. Selain itu, ketakseimbangan pembebahan dapat mempengaruhi kualitas daya listrik, memicu distorsi tegangan, bahkan berdampak pada kinerja peralatan sensitif yang digunakan di lingkungan kampus.

Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi ketakseimbangan pembebahan pada Transformator FKIP Unismuh Makassar. Tujuan penelitian ini meliputi;

- (1) Menilai Level pembebahan Transformator Distribusi serta membandingkannya dengan standar SPLN No.17 Tahun 2014,
- (2) Menganalisis tingkat ketakseimbangan beban antar Fase dan pengaruhnya terhadap arus netral serta rugi – rugi daya.

2 | METODE

2.1 | Metodologi (Methodology)

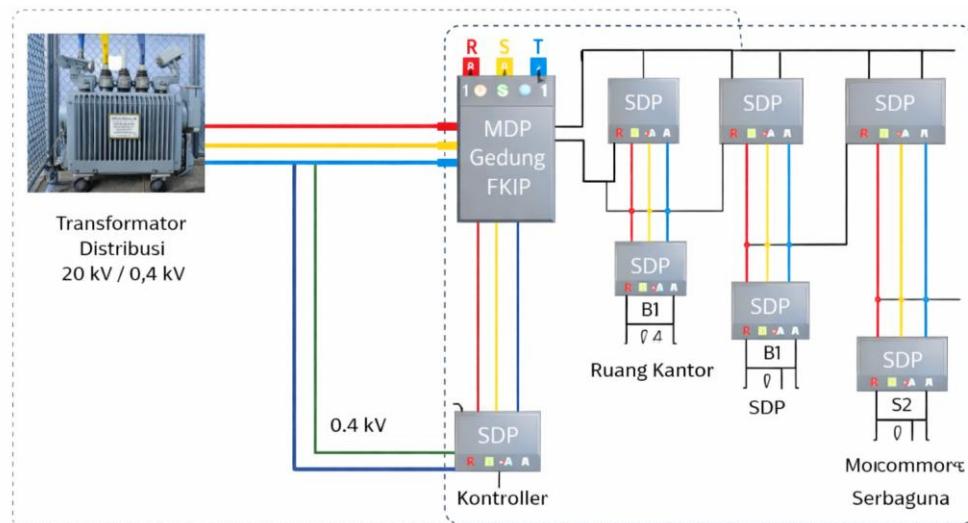
Bab ini menjelaskan pendekatan kuantitatif yang digunakan dalam penelitian ini, yang terdiri atas pengukuran langsung di lapangan serta perhitungan parameter teknis. Studi ini dilakukan secara sistematis untuk menilai pembebahan dan ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi Gedung FKIP Universitas Muhammadiyah Makassar.

2.2 | Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Gedung Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan (FKIP), Universitas Muhammadiyah Makassar. Lokasi ini dipilih karena memiliki karakteristik beban yang kompleks dan beragam, mencakup ruang perkuliahan, laboratorium, perkantoran, serta fasilitas umum lainnya. Transformator yang menjadi objek penelitian adalah transformator distribusi dengan spesifikasi 20 kV/0,4 kV dan daya nominal sebesar 250 kVA.

Transformator ini menyuplai seluruh kebutuhan energi listrik Gedung FKIP dan beroperasi pada sistem tiga fasa. Spesifikasi teknis transformator mencakup tipe pendingin ONAN, konfigurasi belitan Dyn5, serta impedansi sebesar 4%. Gambar lokasi transformator dan denah distribusi jaringan di sekitar gedung dapat disajikan dalam **Gambar 1** untuk menunjukkan area pengamatan.

Secara geografis, lokasi penelitian berada pada koordinat sekitar $5,1871^{\circ}$ Lintang Selatan dan $119,4356^{\circ}$ Bujur Timur. Peta lokasi penelitian beserta titik koordinat transformator distribusi ditunjukkan pada Gambar Peta Lokasi Penelitian.



Gambar 1. Denah Lokasi Tranformator Distribusi dan Sistem Distribusi Internal Gedung FKIP.

2.3 | Peralatan dan Instrumen Pengukuran

Pengukuran dilakukan menggunakan:

- **Clamp Meter Digital Tekiro:** Alat utama untuk mengukur arus pada setiap fasa (R, S, T) dan arus netral secara real-time tanpa perlu memutus aliran listrik. Clamp meter ini memberikan pengukuran yang non-invasif dan cepat, serta memiliki tingkat validitas tinggi untuk keperluan lapangan (Zaki et al., 2024; Casado-Machado et al., 2023).
- **Obeng Tes:** Digunakan untuk memeriksa keberadaan tegangan listrik pada titik-titik tertentu.
- **Sarung Tangan Pelindung:** Menjamin keselamatan operator dari potensi sengatan listrik.

Clamp meter digunakan dengan mempertimbangkan validitas dan keandalannya, yang terbukti efektif untuk aplikasi praktis di lapangan meskipun dipengaruhi oleh medan elektromagnetik eksternal (Laaksonen, 2025).

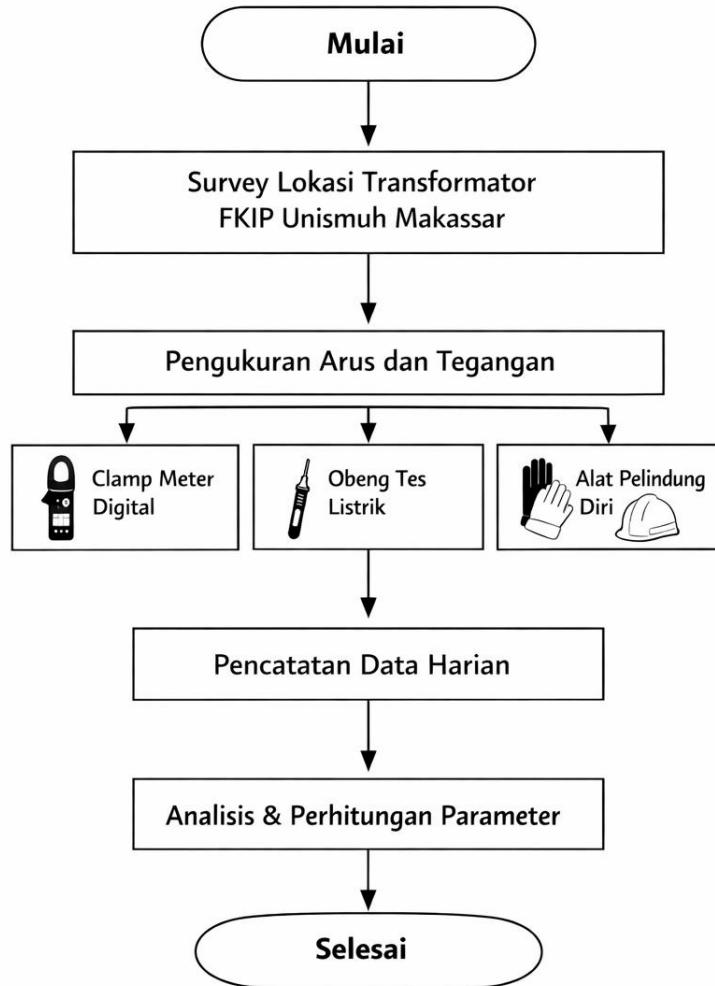
2.4 | Teknik Pengumpulan dan Jenis Data

Data diperoleh melalui pengukuran langsung pada sisi tegangan rendah transformator selama enam hari (Senin–Sabtu) pada pukul 08.00 hingga 16.00 WITA. Pengukuran dilakukan setiap satu jam sekali selama jam operasional kampus.

Jenis data yang dikumpulkan meliputi:

- Arus fasa (R, S, T) dan arus netral
- Tegangan antar fasa dan fasa terhadap netral
- Daya nyata, daya semu, dan cos phi
- Impedansi penghantar dan panjang saluran penyulang

Hasil pengukuran digunakan untuk menyusun grafik variasi harian serta menghitung parameter kelistrikan seperti daya maksimum, minimum, dan ketidakseimbangan beban. Ilustrasi prosedur pengambilan data dapat ditampilkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Diagram Alir Prosedur Pengumpulan Data Lapangan.

2.5 | Variabel Penelitian dan Perhitungan

Variabel yang diamati dalam penelitian ini meliputi:

- Arus fasa (I_R, I_S, I_T)
- Arus netral (I_N)
- Tegangan fasa (V_R, V_S, V_T)
- Daya semu (S), dihitung menggunakan rumus:

$S = I \times V \times \sqrt{3}$ untuk sistem tiga fasa

- Persentase pembebanan transformator:

%Pembebanan = $(I_{rata-rata} / I_{beban penuh}) \times 100\%$

- Tingkat ketidakseimbangan beban:

%Ketidakseimbangan = $((I_{max} - I_{rata-rata}) / I_{rata-rata}) \times 100\%$

- Impedansi (Z), Resistansi (R), dan Reaktansi (X_L):

Dihitung dari parameter arus dan tegangan dengan asumsi $\cos \phi = 0,85$ lagging.

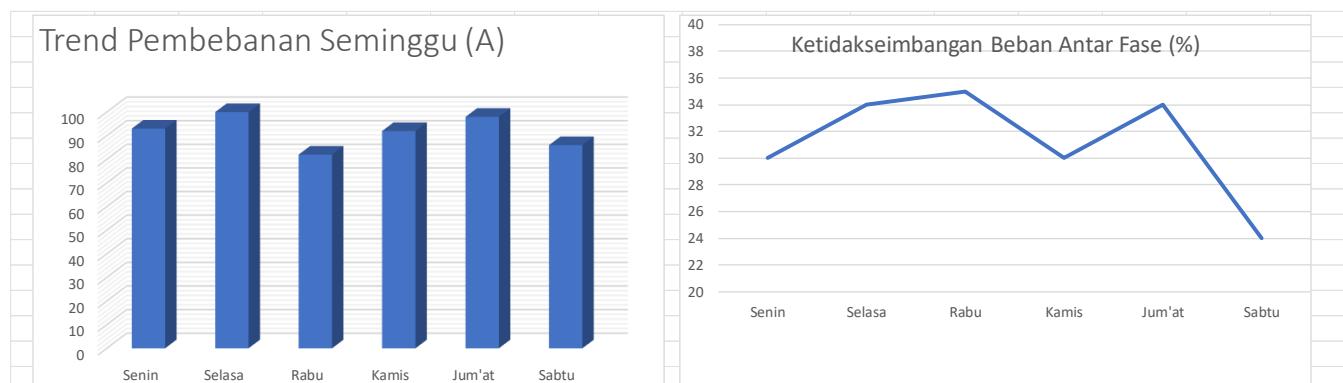
Semua perhitungan dilakukan menggunakan data harian setiap titik waktu pengukuran dan dirangkum dalam bentuk tabel dan grafik untuk kemudahan analisis.

2.6 | Prosedur Analisis Data

Analisis data dilakukan secara bertahap:

1. Menentukan nilai arus rata-rata per fasa dan arus netral dari data pengukuran harian.
2. Menghitung nilai daya semu dan persentase pembebanan transformator.
3. Menganalisis ketidakseimbangan beban berdasarkan distribusi arus antar fasa.
4. Menyusun grafik beban puncak dan minimum harian.
5. Menghitung impedansi, resistansi, dan reaktansi per fasa dari parameter arus dan tegangan.

Hasil analisis digunakan untuk menilai performa transformator terhadap standar SPLN dan menentukan apakah diperlukan intervensi teknis. Grafik tren pembebanan dan ketidakseimbangan akan ditampilkan pada bagian hasil dan dibahas pada bagian diskusi.



Gambar 3. Contoh Grafik Tren Pembebanan Harian dan Ketidakseimbangan Fasa.

2.7 | Survei dan Pengukuran

Tahap survei dan pengukuran dilakukan sebagai langkah awal untuk memperoleh gambaran kondisi aktual sistem distribusi listrik pada transformator yang menyuplai Gedung Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan (FKIP) Universitas Muhammadiyah Makassar. Survei awal meliputi identifikasi lokasi transformator distribusi, pemeriksaan kondisi fisik peralatan, pencatatan spesifikasi nameplate transformator, serta pengamatan pola penggunaan beban listrik di lingkungan gedung FKIP.

Pengukuran dilakukan secara langsung di sisi tegangan rendah (0,4 kV) transformator distribusi dengan menggunakan digital clamp meter. Parameter yang diukur meliputi arus pada masing-masing fasa (R, S, dan T), arus netral (N), serta tegangan fasa terhadap netral (L-N). Pengukuran dilakukan pada jam operasional gedung, yaitu mulai pukul 08.00 hingga 16.00 WITA, selama beberapa hari berturut-turut untuk memperoleh variasi data beban harian.

Data hasil pengukuran kemudian dicatat dan diolah untuk menentukan arus rata-rata, daya semu, persentase pembebanan transformator, serta tingkat ketakseimbangan beban antar fasa. Hasil pengukuran ini digunakan sebagai dasar analisis untuk mengevaluasi kinerja transformator distribusi serta kesesuaiannya dengan standar SPLN yang berlaku.

3 | HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 | Jenis Transformator

Transformator di Gardu Induk ULTG Panakkukang yang menyuplai Unismuh Makassar khususnya Transformator yang menyuplai Gedung FKIP Unismuh Makassar

Spesifikasi Transformator di Gardu Induk ULTG Panakkukang

Tabel 1. Spesifikasi Transformator GI Panakkukang

No.	Parameter	Spesifikasi
1.	Merek	UNINDO
2.	Tahun Pembuatan	2013
3.	Nomor Seri	P060LEC770
4.	Pendingin	ONAN / ONAF
5.	Fase	3
6.	Daya (S)	36 / 60 MVA
7.	Impedans	12,7%
8.	Frekuensi	50 Hz

Tabel 1 Spesifikasi Transformator GI Panakkukang tersebut menyajikan spesifikasi teknis transformator daya yang digunakan dalam penelitian. Transformator bermerek UNINDO ini diproduksi pada tahun 2013 dan memiliki nomor seri P060LEC770 sebagai identitas peralatan. Sistem pendinginan yang diterapkan adalah ONAN (Oil Natural Air Natural) dan ONAF (Oil Natural Air Forced), yang memungkinkan transformator beroperasi pada kondisi beban normal hingga beban yang lebih tinggi dengan pengendalian suhu yang baik.

Transformator ini merupakan transformator tiga fasa dengan kapasitas daya terpasang sebesar 36 MVA pada mode pendinginan ONAN dan dapat ditingkatkan hingga 60 MVA pada mode ONAF. Nilai impedansi sebesar 12,7% menunjukkan karakteristik pembatasan arus hubung singkat serta berpengaruh terhadap regulasi tegangan sistem. Transformator beroperasi pada frekuensi 50 Hz, sesuai dengan standar sistem tenaga listrik di Indonesia.

Transformator Distribusi yang menyuplai Gedung FKIP Unismuh Makassar.

Spesifikasi Transformator Gedung FKIP Unismuh Makassar

Tabel 2. Spesifikasi Transformator yang menyuplai Gedung FKIP Unismuh Makassar

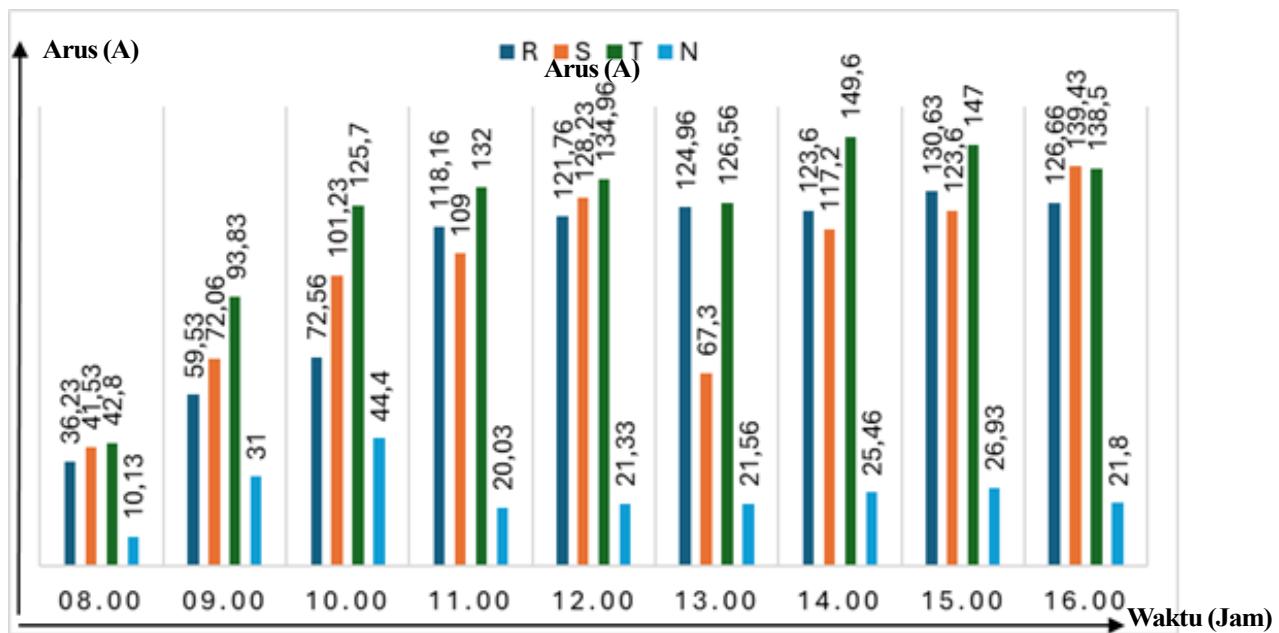
No.	Parameter	Spesifikasi
1.	Merek	TRAFO INDO
2.	Tahun Pembuatan	2024
3.	Tegangan Primer (HV)	20.000 V
4.	Tegangan Sekunder (LV)	400 V
5.	Arus Primer (HV)	7,22 A
6.	Arus Sekunder (LV)	360,84 A
7.	Tipe Transformator	2024 – 250 – AA – Dyn5 – 14
8.	Nomor Seri	243304877
9.	Pendingin	ONAN
10.	Konfigurasi Koneksi Belitan (<i>Vector Group</i>)	Dyn5
11.	Fase	3
12.	Impedans	4%
13.	Frekuensi	50 Hz
14.	Daya (S)	0,25 MVA

Tabel 2. Spesifikasi transformator gedung FKIP Unismuh Makassar tersebut menyajikan spesifikasi teknis transformator distribusi yang digunakan dalam penelitian. Transformator bermerek TRAFO INDO dengan tahun pembuatan 2024 ini beroperasi pada sistem tiga fasa dengan tegangan primer 20 kV dan tegangan sekunder 400 V. Transformator memiliki kapasitas daya terpasang sebesar 0,25 MVA, dengan arus nominal 7,22 A pada sisi primer dan 360,84 A pada sisi sekunder.

Sistem pendinginan yang digunakan adalah ONAN, sedangkan konfigurasi belitan Dyn5 menunjukkan hubungan delta pada sisi tegangan tinggi dan bintang dengan netral pada sisi tegangan rendah. Nilai impedansi sebesar 4% berperan dalam pembatasan arus hubung singkat serta memengaruhi karakteristik regulasi tegangan. Transformator beroperasi pada frekuensi 50 Hz, sesuai dengan standar sistem tenaga listrik.

3.2 | Diagram Data Arus dan Tegangan (L-N) tiap Fase

- Diagram Pengukuran Hari Senin pada pengukuran yang Pertama



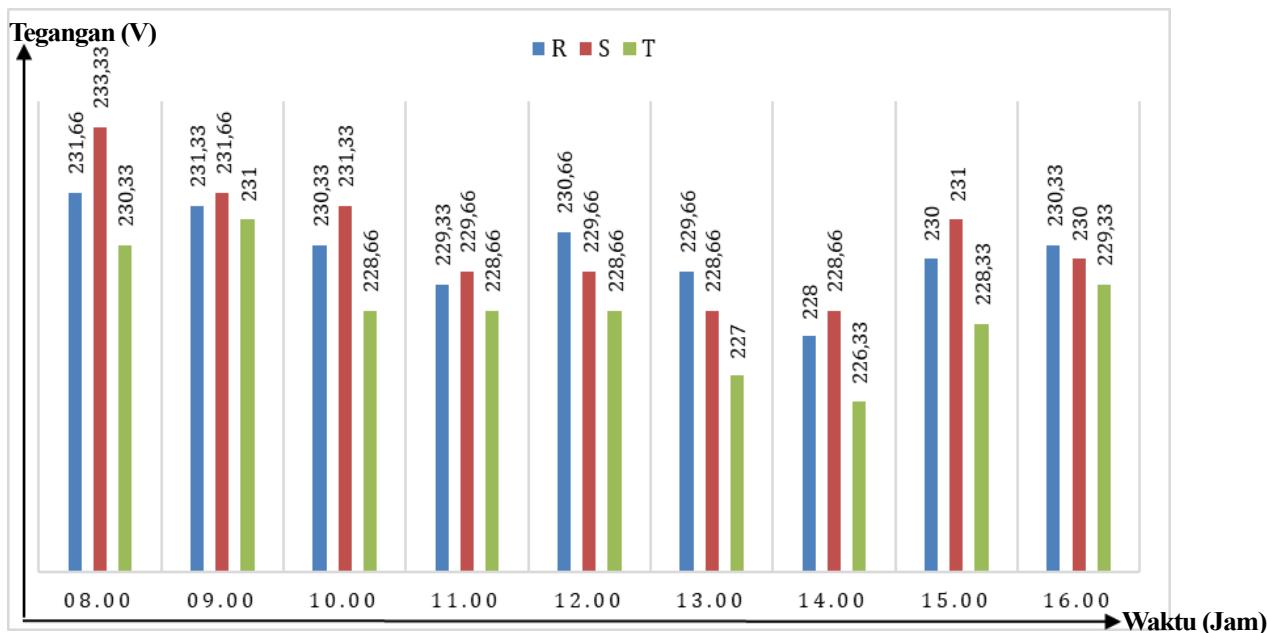
Gambar 4 Diagram Pengukuran Arus Beban Trafo FKIP Unismuh Makassar H - 1

Berdasarkan hasil pengukuran arus beban Transformator yang ditampilkan pada Gambar 4. terlihat bahwa nilai arus pada ketiga Fase (R, S, dan T) mengalami fluktuasi dari pukul 08.00 hingga 16.00 WITA. Pukul 08.00, kondisi beban masih relatif rendah dengan arus Fase R sebesar 36,23 A, Fase S sebesar 41,53 A, dan Fase T sebesar 42,8 A, sedangkan arus netral tercatat sebesar 10,13 A. Seiring bertambahnya waktu, terjadi peningkatan signifikan pada pukul 09.00 dengan arus Fase R sebesar 59,53 A, Fase S sebesar 72,06 A, Fase T sebesar 93,83 A, serta arus netral meningkat hingga 31 A.

Pukul 10.00, arus Fase kembali menunjukkan kenaikan dengan nilai Fase R sebesar 72,56 A, Fase S sebesar 101,23 A, dan Fase T sebesar 125,7 A, sedangkan arus netral tercatat sebesar 44,4 A. Kondisi relatif stabil terjadi pada pukul 11.00 dengan arus Fase R sebesar 118,16 A, Fase S sebesar 109 A, Fase T sebesar 132 A, serta arus netral 20,03 A. Selanjutnya, pada pukul 12.00 beban mengalami peningkatan dengan arus Fase R sebesar 121,76 A, Fase S sebesar 128,23 A, Fase T sebesar 134,96 A, dan arus netral 21,33 A.

Pengukuran pada pukul 13.00, arus beban cenderung merata dengan nilai Fase R sebesar 124,96 A, Fase S sebesar 126,56 A, dan Fase T sebesar 126,56 A, sementara arus netral meningkat signifikan menjadi 67,3 A. Kondisi puncak beban terjadi pada pukul 14.00, di mana arus Fase T mencapai 149,6 A, sedangkan Fase R dan S masing-masing sebesar 117,23 A dan 125 A, serta arus netral sebesar 21,56 A. Pada pukul 15.00, arus beban masih berada pada kondisi tinggi dengan nilai Fase R sebesar 139,63 A, Fase S sebesar 123,5 A, Fase T sebesar 147 A, dan arus netral 25,46 A. Terakhir, pada pukul 16.00 terjadi penurunan dengan arus Fase R sebesar 126,66 A, Fase S sebesar 139,43 A, Fase T sebesar 138,5 A, dan arus netral sebesar 21,8 A.

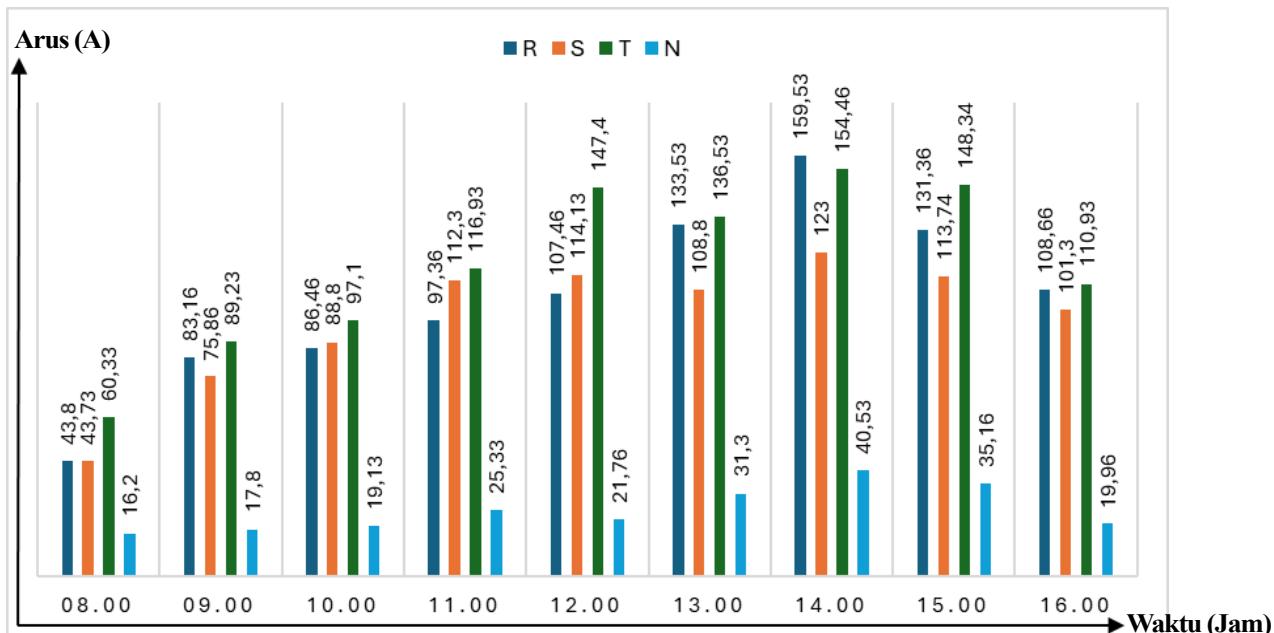
Secara keseluruhan, hasil pengukuran menunjukkan bahwa arus beban Transformator cenderung mengalami peningkatan pada siang hingga sore hari, dengan beban puncak terjadi pada pukul 14.00. Selain itu, dapat diamati adanya Ketakseimbangan beban antar Fase, di mana Fase T cenderung lebih tinggi dibandingkan Fase R dan S pada sebagian besar waktu pengukuran. Hal ini mengindikasikan distribusi beban yang tidak merata pada Transformator, sehingga berpotensi mempengaruhi kinerja Transformator apabila tidak dilakukan pengelolaan beban yang lebih optimal.



Gambar 5 Diagram Grafik Pengukuran Tegangan (L - N) Trafo FKIP Unismuh Makassar H – 1

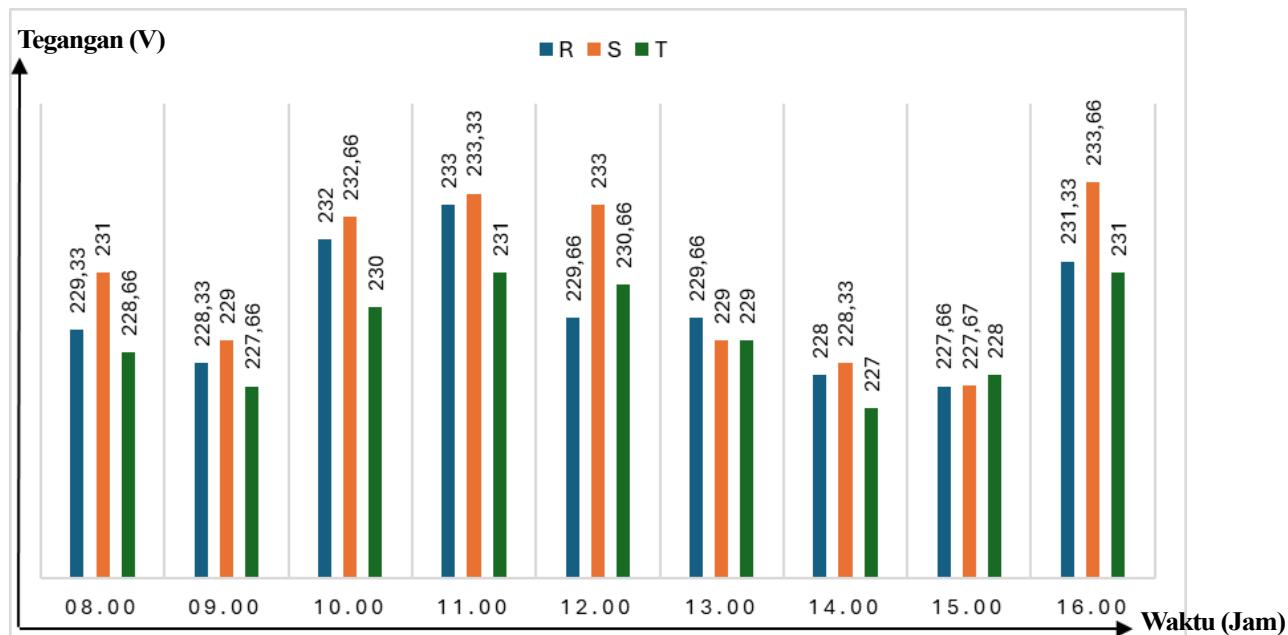
Gambar 5. menunjukkan nilai tegangan pada Fase- R, S, dan T dari pukul 08.00 hingga 16.00. Secara umum, tegangan pada ketiga Fase mengalami penurunan dari pukul 08.00 sampai pada pukul 14.00, dikarenakan Arus pada Jam 08.00 mengalami peningkatan beban arus. tegangan Fase- R tercatat sebesar 231,45 V, Fase- S sebesar 229,93 V, dan Fase- T sebesar 233,83 V. Nilai tegangan ini masih terjaga stabil hingga pukul 12.00, dengan kisaran antara 228,65 V hingga 230,65 V. Sedikit penurunan terjadi pada pukul 13.00 hingga 14.00, di mana tegangan Fase- T menurun hingga 227 V, sementara Fase- R dan S masing-masing tercatat sebesar 229,56 V dan 228,65 V. Setelah itu, tegangan kembali meningkat pada pukul 15.00 hingga 16.00, dengan nilai rata-rata sekitar 230 V. Secara keseluruhan, grafik ini memperlihatkan bahwa kondisi tegangan pada ketiga Fase relatif stabil sepanjang periode pengukuran, dengan fluktuasi kecil yang masih berada dalam batas toleransi standar tegangan distribusi.

- Diagram Pengukuran Hari Selasa pada pengukuran yang Kedua



Gambar 6 Diagram Pengukuran Arus Beban Trafo Unismuh Makassar H – 2

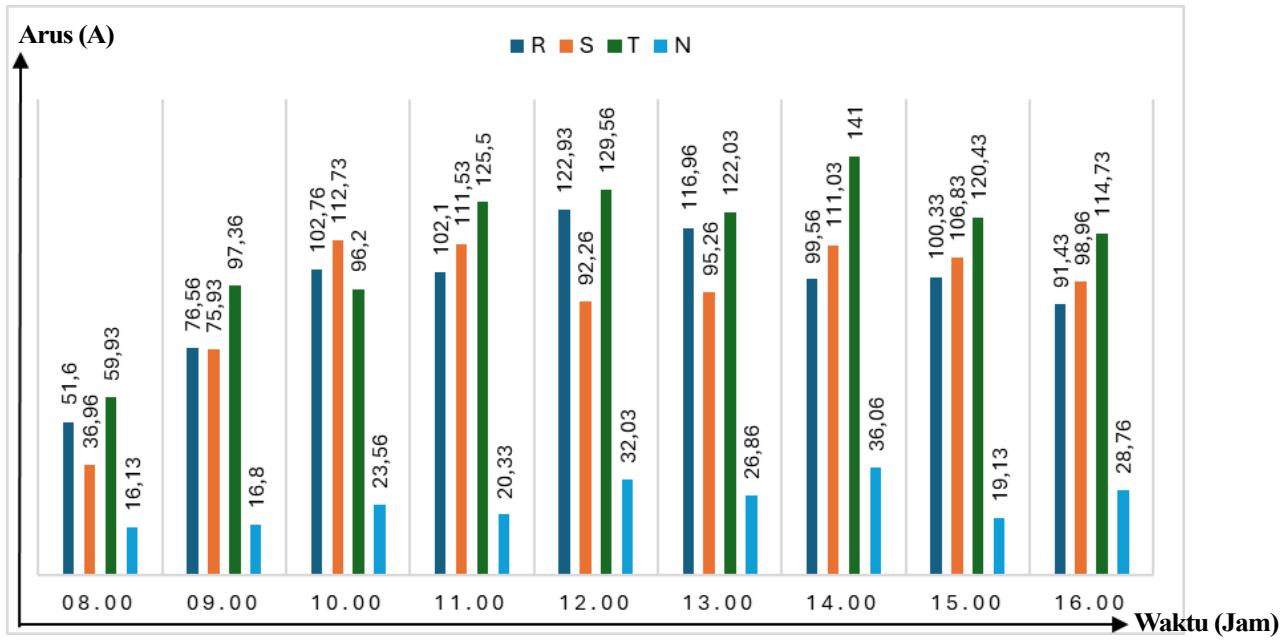
Pada Gambar 6 ditunjukkan variasi arus pada Fase R, S, T, serta arus netral dari pukul 08.00 hingga 16.00. Pada pagi hari, arus ketiga Fase masih rendah dengan arus netral sekitar 16–18 A. Memasuki siang hari beban meningkat, terutama pada Fase T yang mencapai 147,4 A pada pukul 12.00. Kondisi ini menyebabkan arus netral juga naik menjadi 21,76 A. Puncak beban terjadi pada pukul 14.00, di mana Fase R dan T hampir seimbang masing-masing di atas 150 A, sementara Fase S lebih rendah yaitu 123 A. Pada saat ini arus netral mencapai nilai tertinggi sebesar 40,53 A yang menandakan ketakseimbangan beban cukup besar. Setelah itu, beban menurun secara bertahap hingga pukul 16.00 dengan arus netral berkurang menjadi 19,96 A. Secara keseluruhan, beban meningkat bertahap sejak pagi, mencapai puncaknya pada siang hari, lalu menurun kembali menjelang sore, dengan ketakseimbangan terbesar terjadi saat kondisi beban puncak.



Gambar 7 Diagram Grafik Pengukuran Tegangan (L – N) Trafo FKIP Unismuh Makassar H – 2

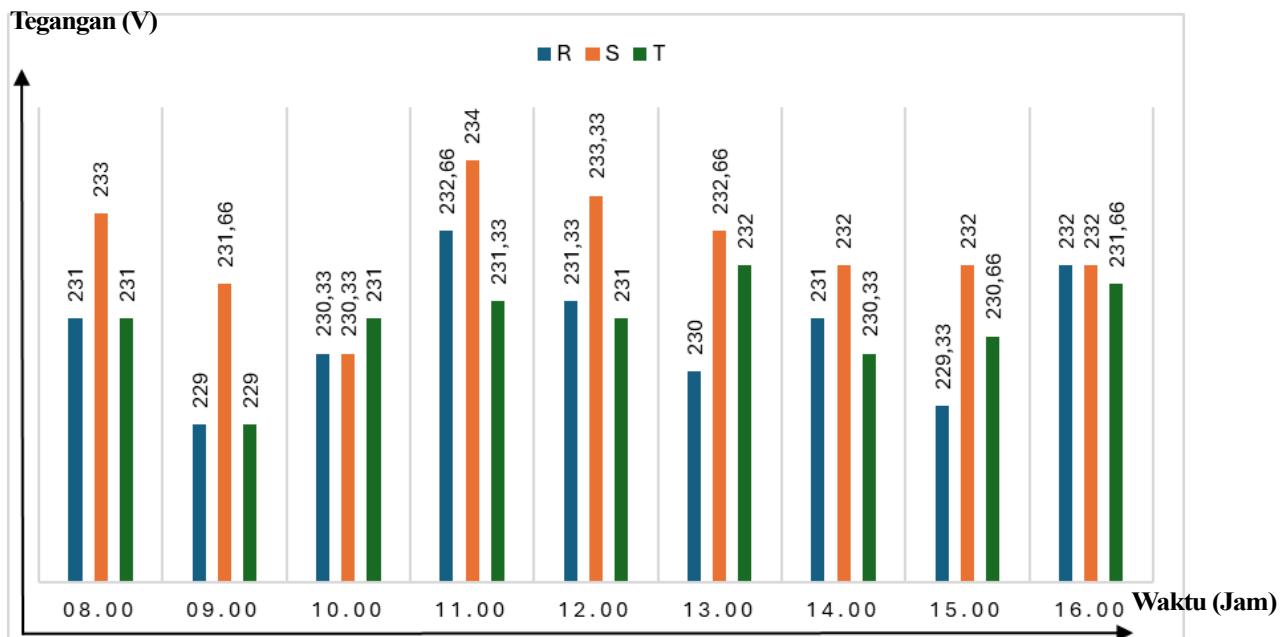
Berdasarkan hasil pengukuran tegangan pada Fase R, S, dan T yang ditampilkan pada Gambar 7 grafik, terlihat bahwa nilai tegangan dari pukul 08.00 hingga 16.00 berada dalam kisaran yang relatif stabil, yaitu antara 227 V hingga 233 V. Tegangan tertinggi tercatat pada pukul 10.00 dan 11.00 dengan nilai mencapai 233 V, sementara tegangan terendah terjadi pada pukul 09.00, 14.00, dan 15.00 dengan nilai sebesar 227 V. Selisih tegangan antar Fase tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, sehingga kondisi sistem dapat dikatakan seimbang. Dengan demikian, kualitas tegangan pada periode pengukuran masih berada dalam batas toleransi standar distribusi, sehingga layak dikategorikan aman untuk mendukung kontinuitas penyaluran daya listrik.

- Diagram Pengukuran Hari Rabu pada pengukuran yang Ketiga



Gambar 8 Diagram Pengukuran Arus Beban Trafo FKIP Unismuh Makassar H - 3

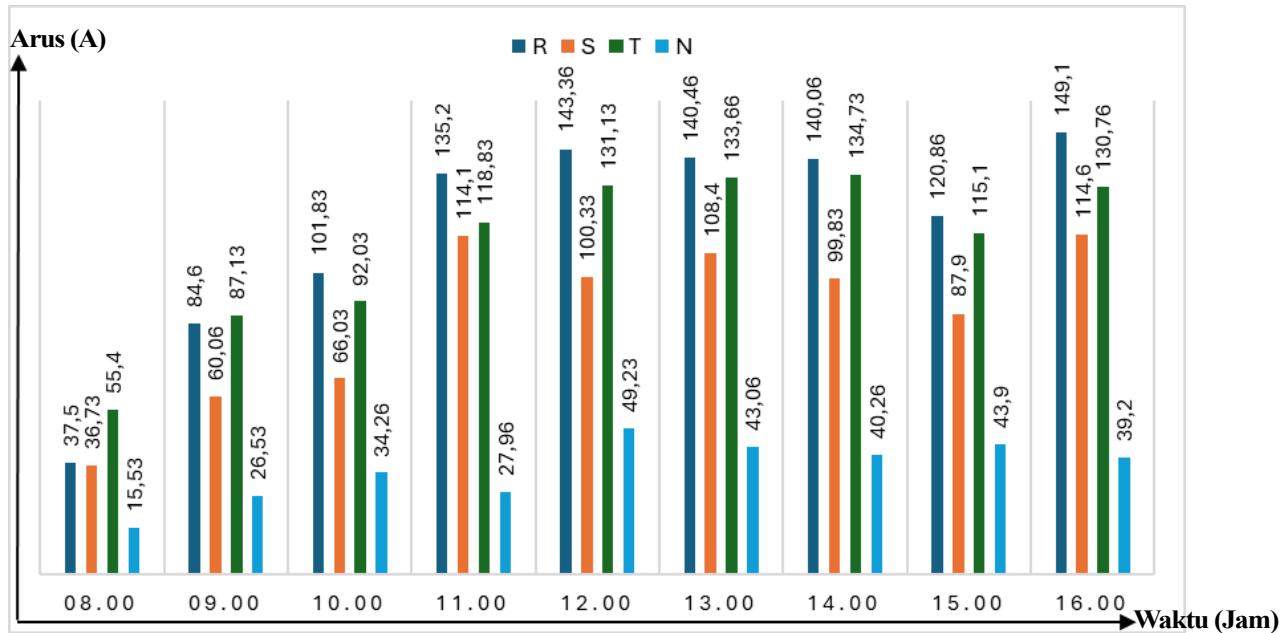
Berdasarkan Gambar 8 menunjukkan profil arus beban pada Fase R, S, T, dan arus netral (N) dari pukul 08.00 hingga 16.00. Pada pukul 08.00 arus beban masih relatif rendah dengan nilai Fase R sebesar 51,46 A, Fase S 36,95 A, Fase T 59,93 A, dan arus netral 15,13 A. Selanjutnya terjadi kenaikan signifikan pada pukul 09.00 dengan Fase T mencapai 97,36 A, sedangkan arus netral tetap pada level 15,68 A. Kondisi beban terus meningkat hingga pukul 11.00, di mana Fase S mencatat arus tertinggi sebesar 115,35 A, diikuti Fase T 122,55 A. Puncak arus beban tercatat pada pukul 14.00 dengan nilai Fase R dan T sama-sama sebesar 141 A, sedangkan Fase S sebesar 111,03 A, serta arus netral mencapai titik tertinggi yaitu 38,56 A. Setelah periode puncak tersebut, beban mengalami penurunan secara bertahap pada pukul 15.00–16.00, di mana Fase R, S, dan T berada pada kisaran 91–100 A, sementara arus netral juga menurun hingga 28,76 A.



Gambar 9 Diagram Grafik Pengukuran Tegangan (L – N) Trafo FKIP Unismuh Makassar H – 3

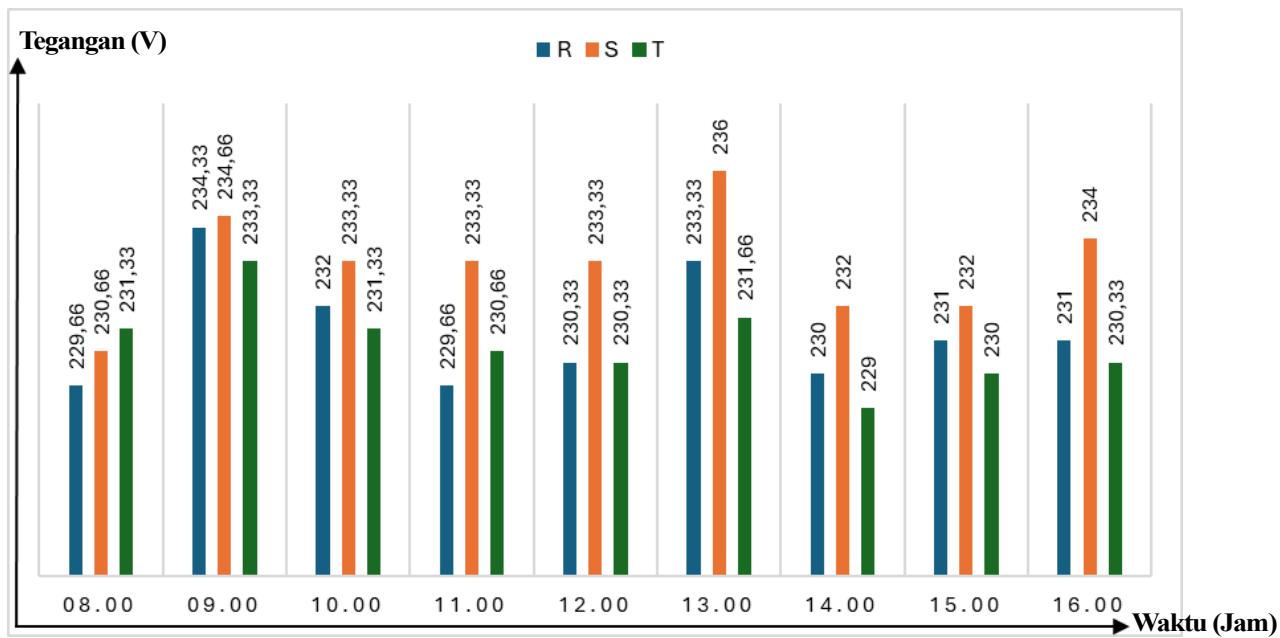
Berdasarkan hasil pengukuran tegangan pada Transformator FKIP Unismuh Makassar yang ditampilkan pada Gambar 9 diperoleh nilai tegangan Fase R, S, dan T terhadap netral berada pada rentang 229 V hingga 234 V. Nilai ini masih mendekati tegangan nominal sistem yaitu 230 V, sehingga dapat dikategorikan dalam kondisi normal. Dari grafik terlihat bahwa pada pukul 08.00 hingga 16.00, tegangan masing-masing Fase menunjukkan ketstabilitan dengan fluktuasi yang relatif kecil, yaitu hanya sekitar 2–4 V antar Fase. Perbedaan tegangan yang terjadi antar Fase masih dalam batas toleransi standar, sehingga tidak menimbulkan ketidakseimbangan beban yang signifikan. Dengan demikian, hasil pengukuran ini menunjukkan bahwa kondisi tegangan keluaran Transformator masih aman dan layak untuk mendukung kontinuitas penyaluran daya listrik. Tidak ditemukan adanya gangguan tegangan yang berpotensi membahayakan peralatan maupun menurunkan kualitas penyaluran energi listrik.

- Diagram Pengukuran Hari Kamis pada pengukuran yang Keempat



Gambar 10 Diagram Pengukuran Arus Beban Trafo FKIP Unismuh Makassar H - 4

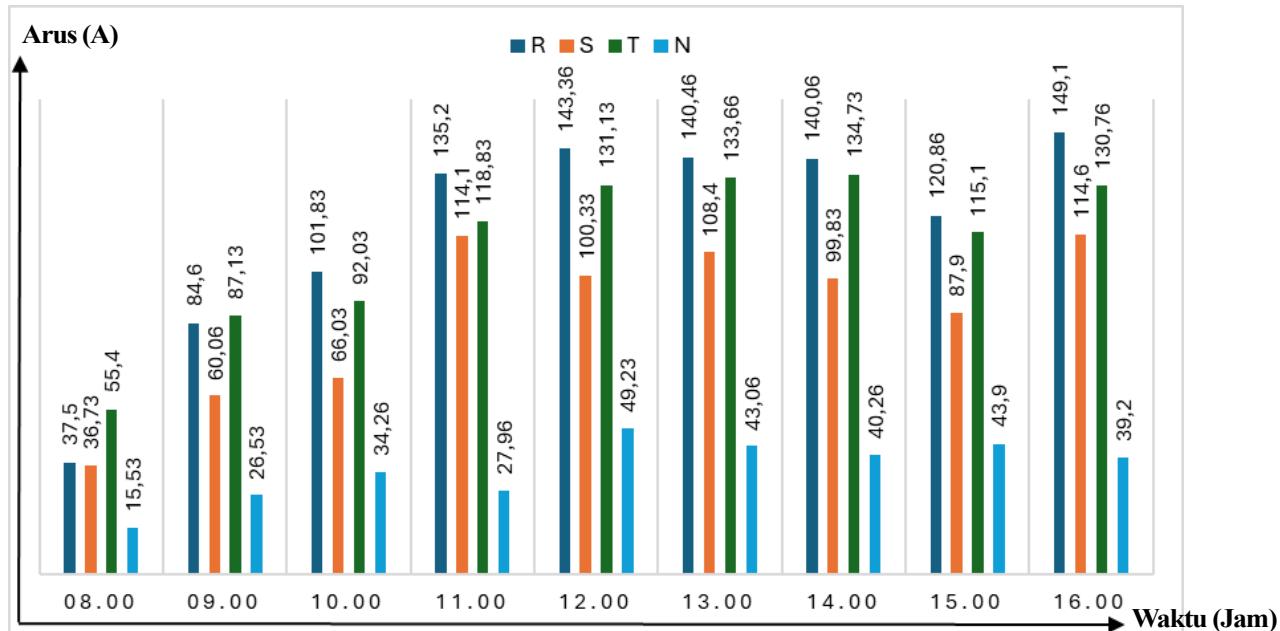
Pada Gambar 10 ditunjukkan grafik arus beban pada Fase R, S, T, dan arus netral (N) dari pukul 08.00 hingga 16.00. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa arus pada ketiga fase mengalami fluktuasi, dengan Fase R cenderung memiliki nilai tertinggi dan mencapai 149,1 A pada pukul 16.00. Arus pada Fase S dan T relatif lebih rendah, meskipun pada pukul 13.00 Fase T mencatat nilai maksimum sebesar 108,4 A, lebih tinggi dibandingkan Fase S sebesar 99,83 A. Arus netral mengalami peningkatan signifikan dari 15,53 A pada pukul 08.00 menjadi 49,23 A pada pukul 12.00 dan selanjutnya berada pada kisaran tinggi, yang mengindikasikan adanya ketidakseimbangan pembebanan antar fase.



Gambar 11 Diagram Grafik Pengukuran Tegangan (L – N) Trafo FKIP Unismuh Makassar H - 4

Berdasarkan hasil pengukuran pada Gambar 11 tegangan pada Transformator FKIP Unismuh Makassar, baik pada pengukuran Fase terhadap netral (L–N) maupun (L–N), diperoleh nilai tegangan berada pada kisaran 228–236 V. Fluktuasi yang terjadi masih relatif kecil dengan perbedaan antar Fase hanya sekitar 2–4 V, sehingga kondisi tegangan dapat dikategorikan stabil dan sesuai dengan standar tegangan nominal 230 V. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa Transformator dalam kondisi aman dan layak untuk mendukung kontinuitas penyaluran daya listrik serta tidak menimbulkan gangguan berarti terhadap kualitas energi listrik maupun peralatan yang terhubung.

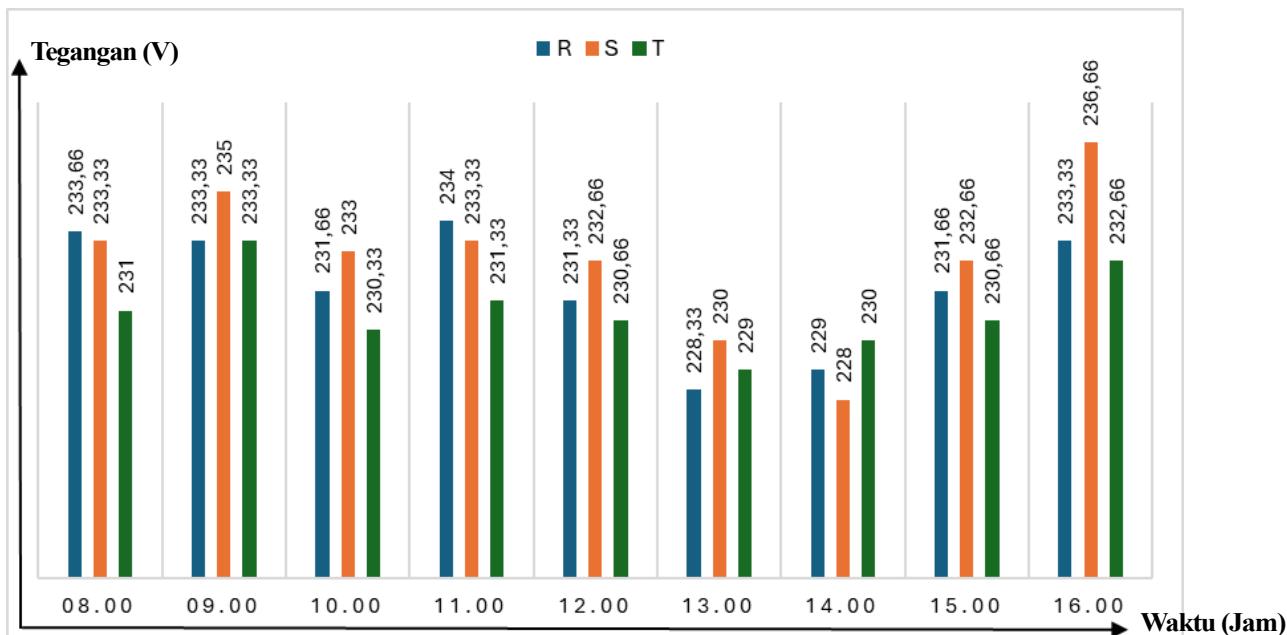
- Diagram Pengukuran Hari Jum'at pada pengukuran yang Kelima



Gambar 12 Diagram Pengukuran Arus Beban Trafo FKIP Unismuh Makassar H - 5

Berdasarkan hasil pengukuran arus pada Gambar 12 pada Fase R, S, T, serta arus netral (N) mulai pukul 08.00 hingga 16.00, terlihat adanya peningkatan beban yang cukup signifikan seiring bertambahnya waktu. Pada pukul 08.00, arus Fase masih relatif rendah yaitu R sebesar 45,33 A, S sebesar 46,53 A, dan T sebesar 44,63 A, sedangkan arus netral hanya 11,1 A. Memasuki pukul 09.00

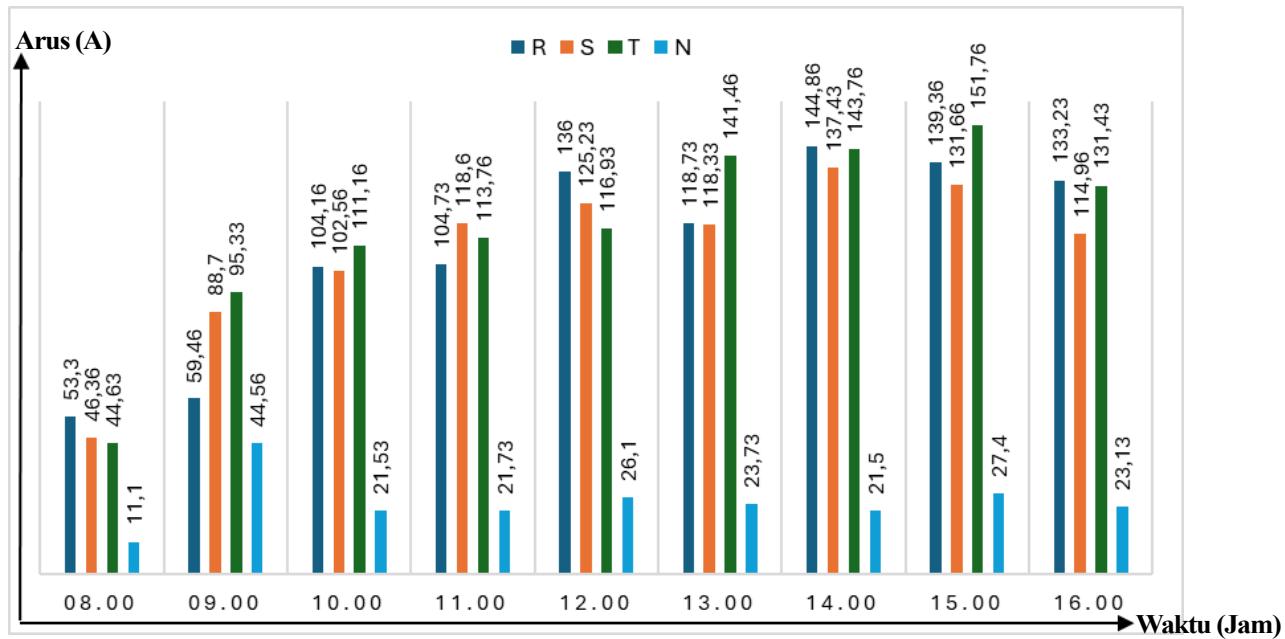
terjadi kenaikan arus dengan nilai tertinggi pada Fase S yaitu 59,46 A, sedangkan arus netral juga meningkat menjadi 4,55 A. Pada pukul 10.00 hingga 11.00, beban terus naik dengan kisaran arus Fase sekitar 102–104 A dan arus netral 21,53 A hingga 21,73 A. Kenaikan signifikan terlihat pada pukul 12.00 sampai 14.00, di mana arus Fase mencapai nilai puncak. Pada pukul 13.00, Fase T dan S tercatat 144,46 A dan 144,56 A, sedangkan arus netral ikut meningkat hingga 23,73 A. Nilai tertinggi terjadi pada pukul 15.00, di mana Fase T mencapai 151,76 A dengan arus netral sebesar 27,4 A, yang menunjukkan kondisi beban puncak sekaligus adanya ketakseimbangan antar Fase. Pada pukul 16.00, arus mulai menurun sedikit, dengan rata-rata Fase sekitar 131–133 A dan arus netral 23,3 A. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa beban mengalami peningkatan dari pagi hingga mencapai puncak pada siang hari, lalu stabil tinggi pada sore hari. Arus netral yang terus meningkat hingga mencapai lebih dari 27 A menandakan adanya ketidakseimbangan beban, sehingga diperlukan upaya penataan ulang distribusi beban antar Fase untuk menjaga kestabilan sistem dan mengurangi rugi-rugi daya pada Transformator.



Gambar 13 Diagram Grafik Pengukuran Tegangan (L – N) Trafo FKIP Unismuh Makassar H - 5

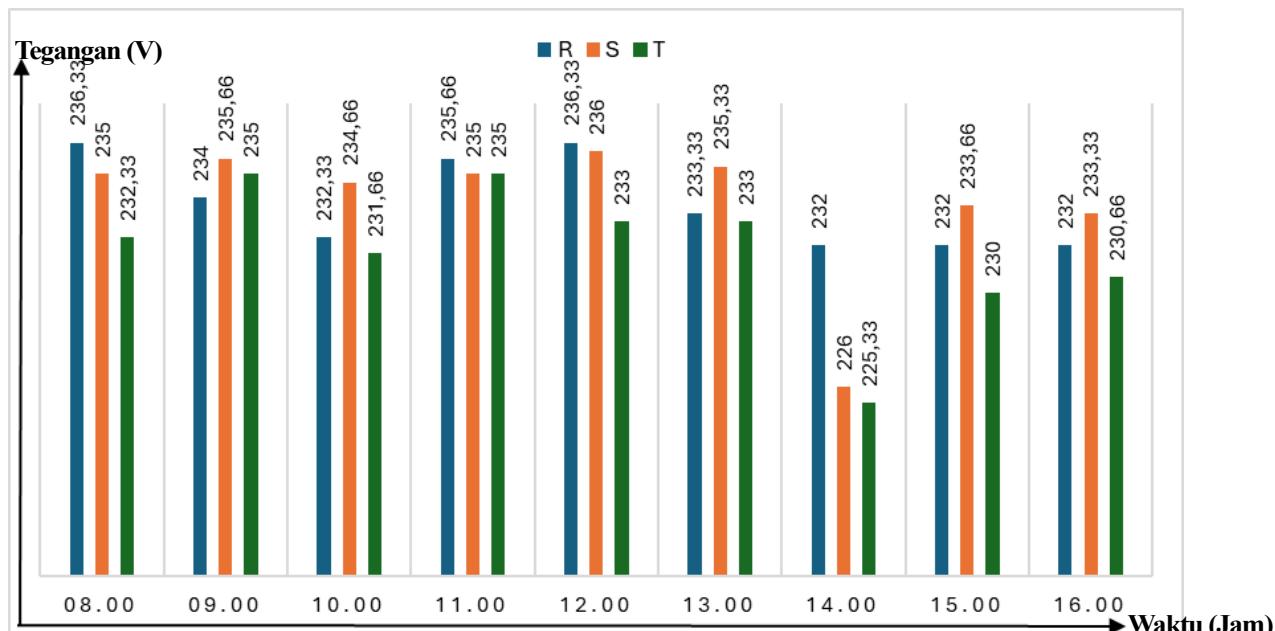
Berdasarkan hasil pengukuran tegangan pada Gambar 13 pada Fase R, S, T, serta arus netral (N) mulai pukul 08.00 hingga 16.00, terlihat adanya peningkatan beban yang cukup signifikan seiring bertambahnya waktu. Pada pukul 08.00, arus Fase masih relatif rendah yaitu R sebesar 45,33 A, S sebesar 46,53 A, dan T sebesar 44,63 A, sedangkan arus netral hanya 1,11 A. Memasuki pukul 09.00 terjadi kenaikan arus dengan nilai tertinggi pada Fase S yaitu 59,46 A, sedangkan arus netral juga meningkat menjadi 4,55 A. Pada pukul 10.00 hingga 11.00, beban terus naik dengan kisaran arus Fase sekitar 102–104 A dan arus netral 21,53 A hingga 21,73 A. Kenaikan signifikan terlihat pada pukul 12.00 sampai 14.00, di mana arus Fase mencapai nilai puncak. Pada pukul 13.00, Fase T dan S tercatat 144,46 A dan 144,56 A, sedangkan arus netral ikut meningkat hingga 23,73 A. Nilai tertinggi terjadi pada pukul 15.00, di mana Fase T mencapai 151,76 A dengan arus netral sebesar 27,4 A, yang menunjukkan kondisi beban puncak sekaligus adanya ketakseimbangan antar Fase. Pada pukul 16.00, arus mulai menurun sedikit, dengan rata-rata Fase sekitar 131–133 A dan arus netral 23,3 A. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa beban mengalami peningkatan dari pagi hingga mencapai puncak pada siang hari, lalu stabil tinggi pada sore hari. Arus netral yang terus meningkat hingga mencapai lebih dari 27 A menandakan adanya ketidakseimbangan beban, sehingga diperlukan upaya penataan ulang distribusi beban antar Fase untuk menjaga kestabilan sistem dan mengurangi rugi-rugi daya pada Transformator.

- Diagram Pengukuran Hari Sabtu pada pengukuran yang Keenam



Gambar 14 Diagram Pengukuran Arus Beban Trafo FKIP Unismuh Makassar H – 6

Berdasarkan pada Gambar 14 grafik hasil pengukuran arus pada Fase R, S, T, dan arus netral (N) dari pukul 08.00 hingga 16.00, terlihat adanya variasi beban yang cukup signifikan sepanjang waktu. Pada pukul 08.00, arus pada ketiga Fase masih relatif rendah dengan nilai R sebesar 25,73 A, S sebesar 32,06 A, dan T sebesar 44,86 A, sedangkan arus netral tercatat 26,26 A. Seiring bertambahnya waktu, beban meningkat cukup tajam, terutama pada pukul 09.00 hingga 11.00. Pada pukul 10.00, arus tertinggi terjadi pada Fase T sebesar 100,03 A, sedangkan arus netral naik menjadi 36,1 A. Kondisi puncak beban terjadi pada pukul 12.00 hingga 13.00, di mana arus Fase T mencapai nilai tertinggi sebesar 162,53 A diikuti oleh Fase S sebesar 98,86 A dan Fase R sebesar 98,13 A, dengan arus netral cukup tinggi yaitu 61,83 A. Hal ini menunjukkan adanya ketakseimbangan beban yang signifikan antar Fase. Setelah itu, pada pukul 14.00 hingga 15.00 arus Fase masih relatif tinggi dengan kisaran 101,53 A hingga 122,36 A, sementara arus netral tetap berada pada angka tinggi sekitar 56,1 A hingga 23,2 A. Memasuki pukul 16.00, beban mulai menurun dengan arus R sebesar 96,26 A, S sebesar 121,36 A, dan T sebesar 121,46 A, sedangkan arus netral turun menjadi 22,9 A.



Gambar 15 Diagram Grafik Pengukuran Tegangan (L – N) Trafo FKIP Unismuh Makassar H

Berdasarkan hasil pengukuran tegangan (L–N) pada Transformator FKIP Unismuh Makassar, diperoleh nilai tegangan Fase R, S, dan T berada pada kisaran 226–236 V. Tegangan tertinggi tercatat pada pukul 11.00–12.00 dengan nilai mencapai 236 V, sedangkan tegangan terendah terjadi pada pukul 14.00 dengan nilai sekitar 226 V. Meskipun terdapat perbedaan tegangan harian, fluktuasi antar Fase masih relatif kecil yaitu sekitar 2–4 V, sehingga dapat dikategorikan dalam batas toleransi standar dan mendekati tegangan nominal 230 V. Dengan demikian, kondisi tegangan pada Transformator tetap stabil dan aman untuk mendukung kontinuitas penyaluran daya listrik serta tidak menimbulkan ketidakseimbangan yang signifikan terhadap kualitas energi listrik maupun peralatan yang terhubung.

3.3 | Perhitungan Impedans, Resistans, dan Reaktans Beban

Beban untuk pukul 08.00

a. Beban Fase R

Data beban Transformator pada Diagram Data Pengukuran Beban Lapangan untuk mencari nilai R (resistans) dan X_L (reaktans induktif) dengan menggunakan rumus $\cos \varphi$ sebagai berikut.

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

$$Z = \frac{V_{LN}}{I}$$

$$Z = \frac{231,6}{36,23}$$

$$Z = 6,39 \Omega$$

dengan asumsi $\cos \varphi = 0,85$ lagging, didapat,

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

$$R = 0,85 \times 6,39 = 5,43 \Omega$$

$$Z^2 = R^2 + X_L^2$$

$$6,39^2 = 5,43^2 + X_L^2$$

$$40,83 = 29,48 + X_L^2$$

$$X_L^2 = 40,83 - 29,48$$

$$X_L^2 = 11,35$$

$$X_L = \sqrt{11,35} = 3,36 \Omega$$

$$X_L = 2\pi f L$$

$$\text{Diperoleh Induktans Beban, } L = \frac{3,36}{314} = 0,010 \text{ H}$$

Dengan cara yang sama dengan perhitungan yang dibuat di atas, nilai R (resistans), X_L (reaktans induktif) dan impedans Z beban pada pengukuran berikutnya diperlihatkan pada Tabel 3.3 sampai Tabel 3.8

Tabel 3 Hasil Perhitungan Nilai Resitans, Reaktans, dan Impedans

Jam	Pengukuran Senin								
	Fase R			Fase S			Fase T		
	R	X_L	Z	R	X_L	Z	R	X_L	Z
	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
08.00	5,43	0,010	6,39	4,77	0,009	5,61	4,57	0,009	5,38
12.00	1,60	0,003	1,89	1,52	0,003	1,79	1,43	0,002	1,69
16.00	1,54	0,003	1,81	1,40	0,002	1,64	1,40	0,002	1,65

Hasil pengukuran pada hari Senin pada tabel 3 diatas menunjukkan bahwa nilai resistansi (R), reaktansi induktif (X_L), dan impedansi (Z) pada Fase R, S, dan T mengalami perubahan terhadap waktu pengamatan. Pada pukul 08.00, nilai impedansi pada seluruh fase relatif tinggi, dengan nilai terbesar terdapat pada Fase R. Selanjutnya, pada pukul 12.00 dan 16.00 terjadi penurunan nilai impedansi pada ketiga fase, yang mengindikasikan peningkatan arus beban sistem. Nilai reaktansi induktif pada seluruh fase relatif kecil dibandingkan nilai resistansi, sehingga karakteristik beban cenderung bersifat resistif. Perbedaan nilai impedansi antar fase menunjukkan adanya ketidakseimbangan pembebanan pada sistem distribusi.

Tabel 4 Hasil Perhitungan Nilai Resitans, Reaktans, dan Impedans

Jam	Pengukuran Selasa								
	Fase A			Fase B			Fase C		
	R	X_L	Z	R	X_L	Z	R	X_L	Z
	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
08.00	4,44	0,008	5,23	4,48	0,008	5,28	3,22	0,006	3,79
12.00	1,81	0,003	2,13	1,73	0,003	2,04	1,32	0,002	1,56
16.00	1,80	0,003	2,12	1,95	0,005	2,30	1,76	0,003	2,08

Pada tabel 4 pengukuran hari Selasa, nilai impedansi antar fase menunjukkan ketidakseimbangan pembebanan. Pada pukul 08.00, impedansi tertinggi terdapat pada Fase B sebesar $5,28 \Omega$, sedangkan terendah pada Fase C sebesar $3,79 \Omega$, dengan selisih $1,49 \Omega$. Pada pukul 12.00, impedansi menurun menjadi $2,13 \Omega$ (Fase A), $2,04 \Omega$ (Fase B), dan $1,56 \Omega$ (Fase C), yang mengindikasikan peningkatan arus beban. Kondisi serupa terjadi pada pukul 16.00 dengan impedansi $2,12 \Omega$, $2,30 \Omega$, dan $2,08 \Omega$. Perbedaan nilai impedansi antar fase tersebut menyebabkan perbedaan arus fasa dan memicu timbulnya arus netral, sehingga menunjukkan adanya ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi.

Tabel 5 Hasil Perhitungan Nilai Resitans, Reaktans, dan Impedans

Jam	Pengukuran Rabu								
	Fase A			Fase B			Fase C		
	R	X_L	Z	R	X_L	Z	R	X_L	Z
	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
08.00	3,79	0,007	4,47	5,53	0,010	6,30	3,27	0,006	3,85
12.00	1,59	0,003	1,88	2,14	0,004	2,52	1,54	0,003	1,82
16.00	2,15	0,004	2,53	5,35	0,010	6,30	1,70	0,003	2,01

Pada tabel 5 pengukuran hari Rabu, nilai impedansi (Z) antar fase menunjukkan ketidakseimbangan beban yang cukup signifikan. Pada pukul 08.00, impedansi tertinggi terjadi pada Fase B sebesar $6,30 \Omega$, sedangkan terendah pada Fase C sebesar $3,85 \Omega$. Pada pukul 12.00, nilai impedansi menurun pada seluruh fase

menjadi $1,88 \Omega$ (Fase A), $2,52 \Omega$ (Fase B), dan $1,82 \Omega$ (Fase C), yang menunjukkan peningkatan arus beban. Pada pukul 16.00, impedansi kembali meningkat pada Fase B sebesar $6,30 \Omega$, sementara Fase A dan Fase C masing-masing sebesar $2,53 \Omega$ dan $2,01 \Omega$. Perbedaan nilai impedansi antar fase ini menyebabkan perbedaan arus fasa dan memicu timbulnya arus netral, yang mengindikasikan adanya ketidakseimbangan pembebanan pada sistem distribusi

Tabel 6 Hasil Perhitungan Nilai Resitans, Reaktans, dan Impedans

Jam	Pengukuran Kamis								
	Fase A			Fase B			Fase C		
	R (Ω)	X_L (Ω)	Z (Ω)	R (Ω)	X_L (Ω)	Z (Ω)	R (Ω)	X_L (Ω)	Z (Ω)
08.00	5,20	0,010	6,12	5,32	0,010	6,27	3,54	0,007	4,17
12.00	1,36	0,002	1,60	1,97	0,003	2,32	1,49	0,002	1,75
16.00	1,30	0,002	1,54	2,99	0,003	2,04	2,24	0,002	1,49

Pada tabel 6 pengukuran hari Kamis, nilai impedansi (Z) antar fase menunjukkan adanya ketidakseimbangan pembebanan. Pada pukul 08.00, impedansi tertinggi terdapat pada Fase B sebesar $6,27 \Omega$, sedangkan terendah pada Fase C sebesar $4,17 \Omega$. Pada pukul 12.00, nilai impedansi pada seluruh fase menurun menjadi $1,60 \Omega$ (Fase A), $2,32 \Omega$ (Fase B), dan $1,75 \Omega$ (Fase C), yang mengindikasikan peningkatan arus beban. Pada pukul 16.00, impedansi Fase A dan B masing-masing tercatat sebesar $1,54 \Omega$ dan $2,04 \Omega$, sedangkan Fase C sebesar $1,49 \Omega$. Perbedaan nilai impedansi antar fase tersebut menyebabkan perbedaan arus fasa dan memicu timbulnya arus netral, yang menunjukkan adanya ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi.

Tabel 7 Hasil Perhitungan Nilai Resitans, Reaktans, dan Impedans

Jam	Pengukuran Jum'at								
	Fase A			Fase B			Fase C		
	R (Ω)	X_L (Ω)	Z (Ω)	R (Ω)	X_L (Ω)	Z (Ω)	R (Ω)	X_L (Ω)	Z (Ω)
08.00	3,72	0,007	4,38	4,27	0,008	25,3	4,39	0,008	5,17
12.00	1,44	0,002	1,70	1,57	0,003	1,85	1,67	0,003	1,97
16.00	1,48	0,002	1,75	1,74	0,003	2,05	1,50	0,002	1,77

Pada pengukuran hari Jum'at, nilai impedansi (Z) antar fase menunjukkan variasi pembebanan. Pada pukul 08.00, impedansi tertinggi terjadi pada Fase B, sedangkan impedansi Fase A dan Fase C relatif lebih rendah. Kondisi ini mengindikasikan adanya ketidakseimbangan beban pada awal pengukuran. Pada pukul 12.00, nilai impedansi pada seluruh fase menurun menjadi $1,70 \Omega$ (Fase A), $1,85 \Omega$ (Fase B), dan $1,97 \Omega$ (Fase C), yang menunjukkan peningkatan arus beban dan pembebanan yang lebih merata. Selanjutnya, pada pukul 16.00 impedansi ketiga fase berada pada kisaran $1,75$ – $2,05 \Omega$, meskipun masih terdapat selisih antar fase yang berpotensi menimbulkan arus netral akibat ketidakseimbangan pembebanan.

Tabel 8 Hasil Perhitungan Nilai Resitans, Reaktans, dan Impedans

Jam	Pengukuran Sabtu								
	Fase A			Fase B			Fase C		
	R	X_L	Z	R	X_L	Z	R	X_L	Z
	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
08.00	7,80	0,011	9,18	4,44	0,008	5,23	6,15	0,012	7,24
12.00	2,04	0,004	2,40	2,03	0,004	2,39	1,21	0,002	1,43
16.00	2,05	0,004	2,42	1,63	0,003	1,92	1,81	0,003	2,13

Pada tabel 8 pengukuran hari Sabtu, nilai impedansi (Z) antar fase menunjukkan ketidakseimbangan pembelahan yang cukup jelas. Pada pukul 08.00, impedansi tertinggi terdapat pada Fase A sebesar $9,18 \Omega$, sedangkan Fase B dan Fase C masing-masing sebesar $5,23 \Omega$ dan $7,24 \Omega$. Kondisi ini menunjukkan perbedaan beban antar fase pada awal pengukuran. Pada pukul 12.00, nilai impedansi menurun pada seluruh fase menjadi $2,40 \Omega$ (Fase A), $2,39 \Omega$ (Fase B), dan $1,43 \Omega$ (Fase C), yang mengindikasikan peningkatan arus beban. Pada pukul 16.00, impedansi Fase A, B, dan C masing-masing tercatat sebesar $2,42 \Omega$, $1,92 \Omega$, dan $2,13 \Omega$. Perbedaan nilai impedansi antar fase tersebut berpotensi menimbulkan perbedaan arus fasa dan arus netral akibat ketidakseimbangan pembelahan pada sistem distribusi.

3.4 | Data Beban Trafo dan Tegangan (L – N) Puncak Harian

Tabel 9 Beban Puncak Arus

Waktu	Beban Puncak					
	Senin	Selasa	Rabu	Kamis	Jum'at	Sabtu
08.00	40,16	49,28	49,49	43,21	48,09	34,21
09.00	74,43	82,75	83,28	77,26	81,16	75,49
10.00	99,8	90,78	103,89	86,63	105,96	84,81
11.00	119,7	108,86	113,04	122,71	112,36	106,13
12.00	128,35	122,99	114,91	124,94	126,05	119,77
13.00	128,66	126,28	111,41	127,50	126,17	121,85
14.00	130,13	145,66	117,19	124,87	142,01	120,61
15.00	133,73	131,14	109,19	107,95	140,92	109,97
16.00	134,83	106,96	101,70	131,48	126,54	108,54

Pada tabel 9 menunjukkan variasi beban puncak arus pada sistem distribusi selama periode pengamatan dari hari Senin hingga Sabtu pada rentang waktu pukul 08.00–16.00. Secara umum, beban arus meningkat mulai pagi hari dan mencapai nilai maksimum pada siang hingga sore hari. Beban puncak tertinggi tercatat pada hari Selasa pukul 14.00 sebesar $145,66 \text{ A}$, diikuti oleh hari Jum'at pukul 14.00 sebesar $142,01 \text{ A}$. Pada hari Senin dan Kamis, beban puncak cenderung terjadi pada pukul 15.00–16.00, masing-masing sebesar $134,83 \text{ A}$ dan $131,48 \text{ A}$. Sementara itu, beban arus pada hari Sabtu relatif lebih rendah dibandingkan hari kerja, dengan nilai maksimum sebesar $121,85 \text{ A}$ pada pukul 13.00. Pola ini menunjukkan bahwa aktivitas beban tertinggi terjadi pada jam operasional utama dan lebih dominan pada hari kerja, yang berpengaruh terhadap tingkat pembelahan transformator dan potensi ketidakseimbangan sistem.

Tabel 10 Beban Puncak Tegangan

Waktu	Beban Puncak					
	Senin	Selasa	Rabu	Kamis	Jum'at	Sabtu
08.00	231,77	229,66	231,66	230,55	232,66	234,55
09.00	231,33	228,33	229,88	234,10	233,88	234,88
10.00	230,10	231,55	230,55	232,22	231,66	232,88
11.00	229,21	232,44	232,66	231,21	232,88	235,22
12.00	229,66	231,10	231,88	231,33	231,55	235,11
13.00	228,44	229,22	231,55	233,66	229,11	233,88
14.00	227,66	227,77	231,11	230,33	229	227,77
15.00	229,77	227,77	230,66	231	231,66	231,88
16.00	229,86	231,99	231,88	231,77	234,21	232,33

Pada tabel 10 menunjukkan variasi tegangan beban pada sistem distribusi selama periode pengamatan dari hari Senin hingga Sabtu pada rentang waktu pukul 08.00–16.00. Secara umum, nilai tegangan berada pada kisaran 227,66 V hingga 235,22 V, yang masih berada dalam batas operasi normal sistem tegangan rendah. Tegangan tertinggi tercatat pada hari Sabtu pukul 11.00 sebesar 235,22 V, sedangkan tegangan terendah terjadi pada hari Senin pukul 14.00 sebesar 227,66 V. Penurunan tegangan cenderung terjadi pada saat beban arus meningkat, terutama pada jam siang hingga sore hari, yang menunjukkan adanya pengaruh pembebatan terhadap profil tegangan sistem. Meskipun demikian, fluktuasi tegangan yang terjadi relatif kecil dan tidak menunjukkan kondisi jatuh tegangan yang signifikan.

3.5 | Daya Rerata Harian Maksimal

Senin , 04 Agustus 2025

Jam 16.00

$$I_L = 134,81 \text{ A}$$

$$V_{LN} = 229,86 \text{ V}$$

Penyelesaian :

$$S = 134,81 \times 229,86 \times 3$$

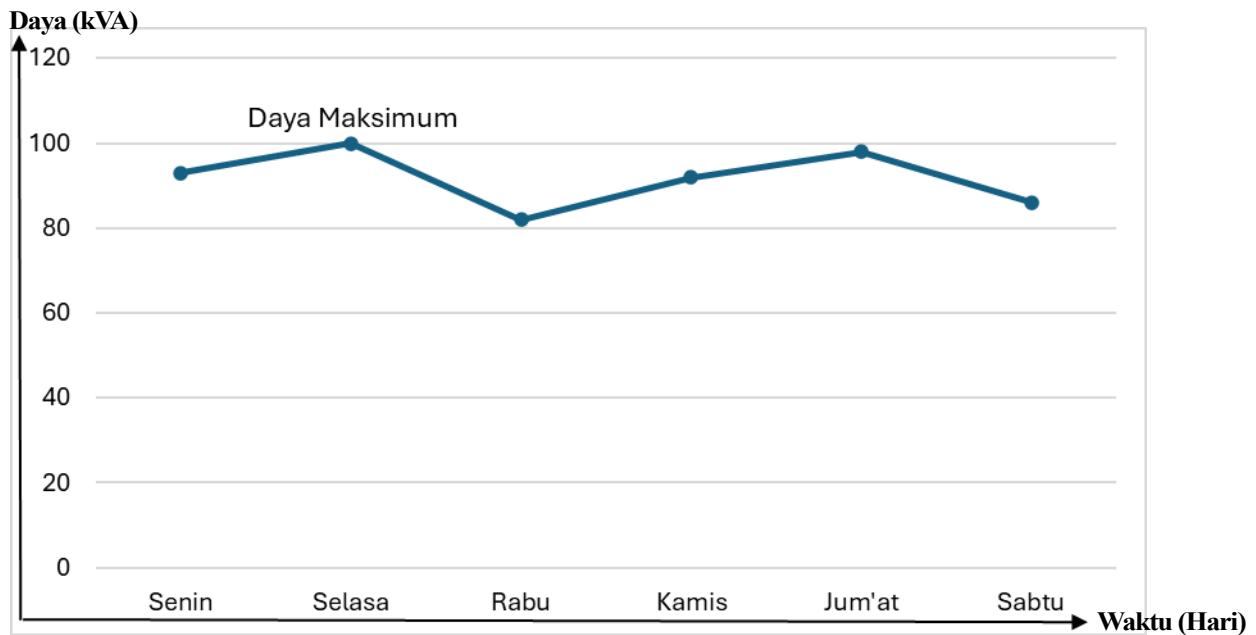
$$S = 92,97 \text{ kVA}$$

Tabel 11 Daya Harian Maksimum dari 4 – 9 Agustus 2025

Hari / Waktu	I	V _{LN}	S (kVA)
Senin 04 Agustus 2025	134,81	229,86	92,97
Selasa 05 Agustus 2025	145,66	227,77	99,53
Rabu 06 Agustus 2025	117,19	231,11	81,25
Kamis 07 Agustus 2025	131,48	231,77	91,41
Jum'at 08 Agustus 2025	142,81	229	97,56
Sabtu 09 Agustus 2025	121,85	233,88	85,49

Pada tabel 11 menunjukkan daya semu maksimum harian pada periode 4–9 Agustus 2025. Daya maksimum tertinggi terjadi pada hari Selasa, 5 Agustus 2025, dengan arus sebesar 145,66 A, tegangan 227,77 V, dan daya semu 99,53 kVA. Sebaliknya, daya maksimum terendah tercatat pada hari Rabu, 6 Agustus 2025,

yaitu sebesar 81,25 kVA pada tegangan 231,11 V. Variasi daya semu maksimum harian dipengaruhi oleh perubahan arus beban, sementara fluktuasi tegangan relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan daya lebih dominan disebabkan oleh kenaikan arus beban. Secara keseluruhan, nilai daya semu maksimum masih berada di bawah kapasitas nominal transformator, sehingga sistem distribusi beroperasi dalam kondisi aman.



Gambar 16 Diagram Daya Maksimal dari 04 - 09 Agustus 2025

Berdasarkan Gambar 16 Daya maksimum dalam seminggu mengalami fluktuasi pada rentang 85 A – 102 A. Nilai tertinggi terjadi pada Selasa (± 102 A), sedangkan nilai terendah pada Rabu (± 85 A). Secara umum, beban arus cenderung stabil dengan sedikit variasi setiap hari, dipengaruhi oleh pola penggunaan listrik.

3.6 | Daya Rerata Harian Minimum

Senin , 04 Agustus 2025

Jam 08.00

$$I_L = 43,21 \text{ A}$$

$$V_{LN} = 230,55 \text{ V}$$

Penyelesaian :

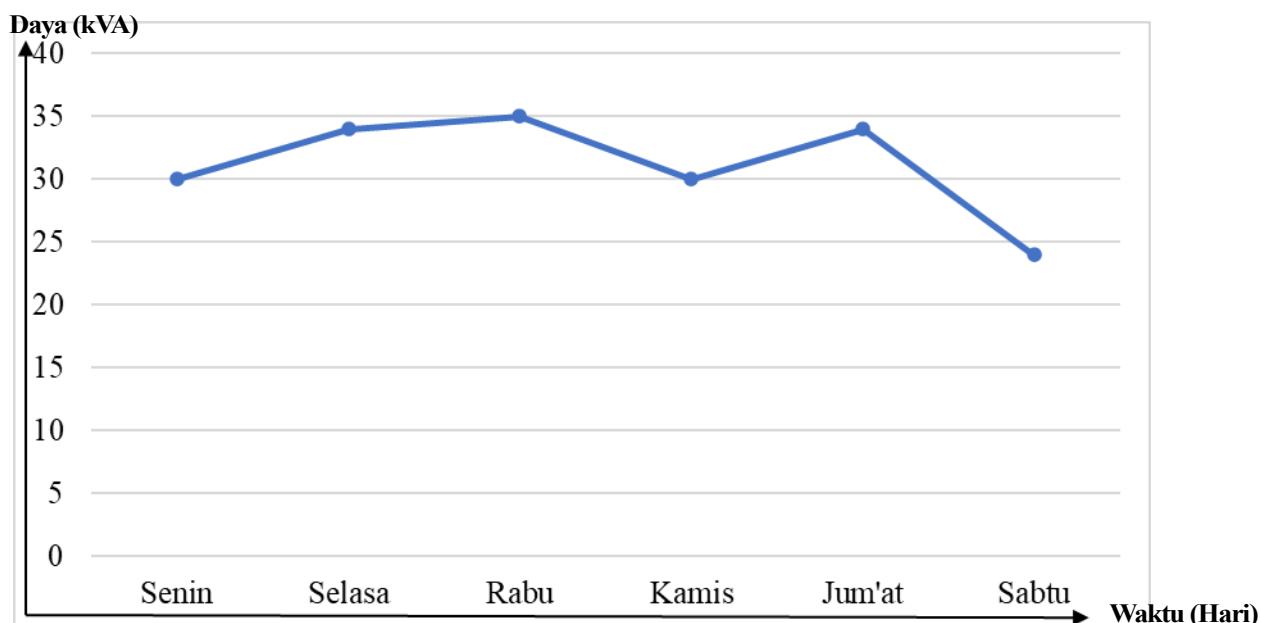
$$S = 43,21 \times 230,55 \times 3$$

$$\mathbf{S = 29,88 \text{ kVA}}$$

Tabel 12 Daya Rerata Harian Minimum 04 – 09 Agustus 2025

Hari/Waktu	I	V _{LN}	S (kVA)
Senin 04 Agustus 2025	43,21	230,55	29,88
Selasa 05 Agustus 2025	49,28	229,66	33,95
Rabu 06 Agustus 2025	49,49	231,66	34,39
Kamis 07 Agustus 2025	43,21	230,55	29,88
Jum'at 08 Agustus 2025	48,09	232,66	33,56
Sabtu 09 Agustus 2025	34,21	234,55	24,07

Pada tabel 12 menyajikan daya semu rerata harian minimum pada periode 04–09 Agustus 2025. Nilai daya terendah tercatat pada hari Sabtu, 09 Agustus 2025, sebesar 24,07 kVA dengan arus 34,21 A dan tegangan 234,55 V. Sementara itu, daya rerata minimum tertinggi terjadi pada hari Rabu, 06 Agustus 2025, sebesar 34,39 kVA. Perbedaan nilai daya rerata minimum antar hari terutama dipengaruhi oleh variasi arus beban, sedangkan tegangan relatif stabil pada kisaran 229,66–234,55 V. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan daya pada kondisi beban minimum lebih dominan disebabkan oleh perubahan arus, bukan fluktuasi tegangan.

**Gambar 17 Diagram Daya Minimum dari 04 – 09 Agustus 2025**

Berdasarkan Gambar 17 arus minimum berada pada rentang 25 A – 36 A. Nilai tertinggi tercatat pada Rabu (± 36 A), sedangkan nilai terendah terjadi pada Sabtu (± 25 A). Secara umum, arus minimum berfluktuasi setiap hari dan cenderung menurun pada akhir minggu akibat berkurangnya aktivitas penggunaan beban listrik.

3.7 | Perhitungan Beban

Level pembebanan pada Transformator Distribusi dapat di analisis secara manual dengan menggunakan Persamaan Berikut

Senin, 04 Agustus 2025

Jam 08.00

$$\% \text{ pembebanan} = \frac{I_{\text{rata-rata}}}{I_{\text{beban penuh}}} \times 100\%$$

$$\% \text{ pembebanan} = \frac{40,18}{361} \times 100\%$$

$$\% \text{ pembebanan} = 0,111 \times 100\%$$

$$\% \text{ pembebanan} = 11,13\%$$

Tabel 13 Data % Pembebanan Beban

Hari	Waktu	I _{beban penuh} (A)	I _{rata-rata} (A)	%Pembebanan
Senin	08.00	361	40,18	11,1
	12.00	361	128,31	35,5
	16.00	361	134,86	37,3
Selasa	08.00	361	49,28	13,6
	12.00	361	122,99	34
	16.00	361	106,96	29,6
Rabu	08.00	361	49,49	13,7
	12.00	361	114,91	31,8
	16.00	361	101,70	21,8
Kamis	08.00	361	43,21	11,9
	12.00	361	0,21	34,6
	16.00	361	131,48	36,4
Jum'at	08.00	361	48,09	13,3
	12.00	361	126,05	34,9
	16.00	361	126,54	35
Sabtu	08.00	361	34,21	9,4
	12.00	361	119,77	33,1

16.00	361	108,54	30
-------	-----	--------	----

Berdasarkan hasil pengukuran arus rata-rata (I rata-rata) dan persentase pembebanan terhadap arus beban penuh (I beban penuh = 361 A), diperoleh data pembebanan Transformator selama enam hari (Senin–Sabtu) pada *Tiga* waktu pengukuran, yaitu pukul 08.00, 12.00, dan 16.00.

Secara umum, nilai persentase pembebanan Transformator berada pada rentang 9,4% hingga 37,3% dari kapasitas nominal. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi Transformator masih bekerja jauh di bawah batas kapasitas penuh yang diizinkan, sehingga dapat dikatakan Transformator dalam keadaan aman dari risiko kelebihan beban.

Pada hari Senin, terlihat adanya kenaikan signifikan dari beban pagi (08.00) sebesar 11,1% menjadi 37,3% pada sore (16.00). Tren serupa juga tampak pada hari-hari lainnya, di mana beban terendah cenderung terjadi pada pagi hari, sedangkan beban tertinggi terjadi pada siang hingga sore hari.

Hari Selasa menunjukkan pola beban tertinggi pada pukul 12.00 dengan 34,0%, kemudian mengalami penurunan pada sore hari menjadi 29,6%. Sementara itu, pada Rabu, meskipun beban pagi (13,7%) relatif rendah, beban maksimum siang hari mencapai 31,8%, lalu turun pada sore hari menjadi 21,8%.

Hari Kamis juga menunjukkan kondisi yang serupa dengan beban pagi sebesar 11,9%, kemudian meningkat pada siang hari menjadi 34,6%, dan kembali naik tipis pada sore hari menjadi 36,4%. Adapun pada Jumat, beban relatif stabil dengan nilai antara 13,3% – 35,0%, menunjukkan pola distribusi yang cukup konsisten. Sedangkan pada Sabtu, beban pagi tercatat paling rendah dibandingkan hari lainnya yaitu hanya 9,4%, kemudian meningkat pada siang hari menjadi 33,1%, sebelum sedikit menurun pada sore hari menjadi 30,0%.

Dari keseluruhan data, dapat disimpulkan bahwa:

1. Beban Transformator tertinggi terjadi pada Senin pukul 16.00, yaitu sebesar 37,3% dari kapasitas penuh.
2. Beban Transformator terendah terjadi pada Sabtu pukul 08.00, yaitu sebesar 9,4% dari kapasitas penuh.
3. Pola umum pembebanan menunjukkan peningkatan dari pagi menuju siang dan cenderung stabil atau menurun sedikit pada sore hari.
4. Tingkat pembebanan Transformator masih berada pada kategori rendah, sehingga kapasitas Transformator masih sangat mencukupi untuk melayani kebutuhan beban saat ini.

3.8 | Level Ketakseimbangan Beban Transformator

Demikian, untuk menentukan persentase ketakseimbangan beban rata – rata dapat digunakan Persamaan berikut

$$\% \text{Ketakseimbangan} = \frac{\{|a - 1| + |b - 1| + |c - 1|\}}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketakseimbangan} = \frac{\{|36,23 - 1| + |41,53 - 1| + |42,8|\}}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketakseimbangan} = \frac{\{|35,23| + |40,53| + |41,8|\}}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketakseimbangan} = \frac{\{117,56\}}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketakseimbangan} = 39,18 \times 100\%$$

$$\% \text{Ketakseimbangan} = 3,91\%$$

Tabel 14 Ketakseimbangan Beban dari 04 – 09 Agustus 2025

No.	Hari	Waktu	Daya Semu (MVA)	Beban Penuh Transformator (A)	Beban (%)	Ketakseimbangan Beban (A)			Percentase Ketakseimbangan Beban (%)
						I_R	I_S	I_T	
1.	Senin	08.00	27,923	361	66	0,90	1,03	1,06	3,91
		12.00	88,430	361	58	0,94	0,99	1,05	12,73
		16.00	92,97	361	58	0,93	1,03	1,02	13,38
2.	Selasa	08.00	33,952	361	61	0,88	0,88	1,22	4,82
		12.00	85,268	361	58	0,87	0,92	1,19	12,19
		16.00	74,440	361	59	1,01	0,94	1,03	10,59
3.	Rabu	08.00	34,394	361	61	1,04	0,74	1,21	4,84
		12.00	79,935	361	60	1,06	0,80	1,12	11,39
		16.00	70,74	361	59	0,89	0,97	1,12	10,07
4.	Kamis	08.00	29,886	361	61	0,86	0,85	1,28	4,22
		12.00	86,707	361	178	1,14	0,80	1,04	12,39
		16.00	91,419	361	59	1,13	0,87	0,99	13,04
5.	Jum'at	08.00	33,565	361	60	1,10	0,96	0,92	4,70
		12.00	87,560	361	60	1,07	0,99	0,92	12,50
		16.00	88,910	361	60	126,54	0,90	1,03	12,55

4 | KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran, analisis data lapangan, dapat disimpulkan bahwa Transformator Distribusi di Kampus Unismuh Makassar mengalami Ketakseimbangan beban yang cukup signifikan antar Fase. Ketakseimbangan ini ditunjukkan dengan adanya variasi arus yang tidak merata pada setiap Fase dan menghasilkan arus netral yang cukup tinggi, terutama saat beban puncak terjadi. Kondisi ini berpotensi menyebabkan kerugian daya, menurunkan efisiensi kerja Transformator, serta mempercepat kerusakan peralatan listrik. Selain itu, hasil simulasi menunjukkan bahwa tingkat pembebahan Transformator bervariasi dari waktu ke waktu, dengan beberapa kondisi mendekati ambang batas kategori “cukup” menurut standar PLN. Melalui simulasi ini, diperoleh informasi penting terkait level Ketakseimbangan dan pembebahan Transformator yang dapat dijadikan dasar bagi pihak kampus maupun PLN dalam mengambil langkah-langkah perbaikan dan perencanaan sistem distribusi listrik yang lebih andal dan efisien ke depan

Daftar Pustaka

- Adityawarman, D., Rahajo, Y., & Hakim, L. (2014). Rancang Bangun Alat Ukur Arus Menggunakan Transformator Arus Berbasis Mikrokontroler Atmega32. *Electrician*, 8(2), 45–56. <https://electrician.unila.ac.id/index.php/ojs/article/view/113>
- Fadila, D., & Widodo, A. (2021). Norton 3. *Jurnal Penggunaan Alat Ukur*, 1(60111), 1–3.
- Faharuddin, A. (2002). *Analisi Gangguan Simetris Dengan Menggunakan Metode Mva Hubung-Singkat (Mva Sc)*. 2, 1–7.
- Furqon, W. A., Muljanto, W. P., & Agustini, N. P. (2023). Rancang Bangun Sistem Cos Phi Analyzer Untuk Penentuan Nilai Kapasitor. *Magnetika*, 7(2), 17–26.
- Ketakseimbangan, A., Transformator, B., Kv, D., Studi, P., Teknik, S., Teknik, F., Surabaya, U. N., Elektro, D. T., Teknik, F., & Surabaya, U. N. (2019). *Zainal Sya 'roni Tri Rijanto*.
- Liliana. (2012). Analisa Pengaruh Ketakseimbangan Beban terhadap Efisiensi Listrik dalam Rangka Konservasi Energi di Gedung Rektorat UIN Suska Riau. *Seminar Nasional Teknologi Informasi Komunikasi Dan Industri (SNTIKI)* 4, 384–390.
- Mustika, A., Putri, N. A., Hafid, A., & Faharuddin, A. (2023). Studi Komparasi Spektrum Harmonik Gangguan Internal Dan Inrush Current Pada Trafo Daya Menggunakan Perangkat Lunak PSCAD (Power System Computer Aided Design). *Vertex Elektro*, 15(1), 89–97.
- Pratama, M. F., Arsyad, I. M. I., Abidin, Z., Eng, M., Teknik, F., & Pontianak, U. T. (2023). PERHITUNGAN KETAKSEIMBANGAN BEBAN PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI Di PT. PLN (Persero) ULP PUTUSSIBAU. *Jurnal Teknik Elektro*, 1.
- Roza, I. (2018). Analisis Penurunan Cos phi dengan menentukan Kapasitas Kapasitor Bank Pada Pembangkit Tenaga Listrik Pabrik Kelapa Sawit (PKS) Decrease Analysis of Cos phi by determining the Capacitive Capacity of Banks in Oil Palm Pabrik Kelapa Sawit (PKS). *Journal of Electrical and System Control Engineering*, 2(1), 1–10. <http://ojs.uma.ac.id/index.php/jesce>
- Ruliyanto, R. (2020). Pengaruh Ketakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Arus Ground pada Trafo 1 dan Trafo 2 pada Beban Puncak Sesaat.

- Jurnal Ilmiah Giga*, 23(1), 27. <https://doi.org/10.47313/jig.v23i1.867>
- Siboro, D. A. S., Arsyad, M. I., & Junaidi. (2024). Analysis of Transformer Loading Imbalance at the Faculty of Engineering, Tanjungpura University. *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology (J3EIT)*, 12(2), 385–395. <https://doi.org/10.26418/j3eit.v12i2.77061>
- Suripto, I. S. M. E. (2017). Sistem Tenaga Listrik. *ELTEK, Vol 11 Nomor 01*, 1–293.
- Suyandi, E., Ir Muhammad Suyanto, dan M., Pembimbing, D., Teknik Elektro, J., Teknologi Industri, F., Sains, I., Akprind, T., JlKalisahak, Y., & Balapan Tromol, K. (2017). Analisis Ketaksimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Area Rayon Yogyakarta Kota Di Pt. Pln (Persero) Apj Gedong Kuning Yogyakarta. *Jurnal Elektrikal*, 4(2), 1–10.
- Yaved Pasereng Tondok, Lily Setyowaty Patras, & Fielman Lisi. (2019). Yaved Pasereng Tondok. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer*, 8(2), 83–92.
- Zaki et al., 2024; Casado-Machado et al., 2023**