ANALISIS DAN EVALUASI SISTEM DISTRIBUSI LISTRIK TIGA FASA DI GEDUNG YAYASAN MAJELIS PENDIDIKAN DARUL HIKAM

Mugni Labib Edypoerwa[1], Muhammad Fauzan Al Anshori[2], Umar Hanif Ramadhani[3], Ayu Laksmi Padmadewi[4]

[1,2,3,4,5]Program Studi Teknik Energi Terbarukan, Universitas Pendidikan Indonesia

[1]mugnile@upi.edu , [2]anshorifauzanm@upi.edu , [3]umar.hanif@upi.edu , [4]ayulaksmi@upi.edu

ABSTRACT

Load imbalance in three-phase electrical distribution systems reduces efficiency, increases power losses, and raises the risk of electrical disturbances. This study analyzes three-phase load imbalance conditions at the Yayasan Majelis Pendidikan Darul Hikam (MPDH) Building using an Internet of Things (IoT)-based Energy Monitoring System (EMS) comprising three PZEM-004T modules, an ESP32 microcontroller, and a web-based dashboard. Analyzed parameters include phase-to-neutral voltage, current, active power, power factor, and frequency. Results show that phase R is dominant with an average current of 9.665 A, while phases S and T recorded 4.033 A and 4.616 A, respectively. The inter-phase current difference reached 97.22% relative to the three-phase average, indicating significant load imbalance. Phase R voltage averaged 242.13 V with a maximum of 248.3 V, partially exceeding the upper limit of PLN standards. Branch MCB capacities on phases R, S, and T are 46 A, 16 A, and 64 A, respectively, against a 60 A incoming MCB per phase, all within safe operating limits. Load redistribution from phase R to phase S is recommended to improve distribution balance.

Keywords*: load imbalance; three-phase distribution system; energy monitoring system; Internet of Things; educational building.*

ABSTRAK

Ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi listrik tiga fasa dapat menyebabkan turunnya efisiensi, meningkatnya rugi-rugi daya, dan risiko gangguan kelistrikan. Penelitian ini menganalisis kondisi ketidakseimbangan beban tiga fasa pada Gedung Yayasan Majelis Pendidikan Darul Hikam (MPDH) menggunakan *Energy Monitoring System* (EMS) berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan tiga modul PZEM-004T, mikrokontroler ESP32, serta *dashboard* berbasis web. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan fasa-netral, arus, daya aktif, faktor daya, dan frekuensi. Hasil pemantauan menunjukkan fasa R mendominasi dengan rata-rata arus 9,665 A, sedangkan fasa S dan T masing-masing 4,033 A dan 4,616 A. Selisih arus antar fasa mencapai 97,22% terhadap rata-rata tiga fasa, mengindikasikan ketidakmerataan pembebanan yang signifikan. Tegangan fasa R

rata-rata 242,13 V dengan maksimum 248,3 V, sebagian melampaui batas atas standar PLN. Kapasitas MCB cabang fasa R, S, dan T masing-masing 46 A, 16 A, dan 64 A terhadap MCB *incoming* 60 A per fasa, seluruhnya masih dalam batas aman. Redistribusi beban dari fasa R ke fasa S direkomendasikan untuk meningkatkan keseimbangan distribusi listrik gedung.

Kata kunci: ketidakseimbangan beban; sistem distribusi tiga fasa; *energy monitoring system*; *Internet of Things*; bangunan pendidikan.

A. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan utama operasional bangunan Pendidikan karena penggunaan berbagai macam beban listrik. Penambahan beban listrik yang terjadi secara bertahap seringkali tidak disertai pemeriksaan ulang distribusi beban antar fasa, sehingga dapat menyebabkan salah satu fasa menanggung beban jauh lebih besar dibandingkan fasa lainnya.

Ketidakseimbangan beban pada sistem tiga fasa mengakibatkan perbedaan arus antar fasa, seperti munculnya arus pada konduktor netral [1], serta peningkatan panas pada penghantar dan sambungan yang mengurangi keandalan sistem distribusi [2]. Pada bangunan pendidikan, kondisi ini berpotensi menghambat kegiatan belajar mengajar apabila sistem proteksi bekerja pada jam operasional.

Cahyaningrum et al menemukan bahwa ketidakseimbangan tegangan dan arus menyebabkan turunnya efisiensi sistem distribusi pada bangunan pendidikan [3]. Hermawan et al. menunjukkan bahwa distribusi beban yang terpusat pada satu fasa dalam sistem tiga fasa menghasilkan ketidakseimbangan arus yang signifikan [4]. Kedua temuan tersebut menegaskan perlunya pemeriksaan beban per fasa secara *real-time* untuk mengetahui kondisi distribusi secara akurat.

Pengunaan alat ukur hanya memberikan informasi pada waktu tertentu dan tidak menggambarkan pola beban secara kontinu. IEEE 1159-2019 merekomendasikan pemantauan sistem tenaga AC secara berkelanjutan dengan teknik dan interpretasi yang sistematis [5]. Sistem EMS berbasis IoT yang telah terpasang di Gedung Yayasan MPDH memungkinkan perolehan data kelistrikan per fasa secara *real-time* dan kontinu untuk mengidentifikasi fasa dengan pembebanan terbesar.

Peneltian Padmadewi et al. telah berhasil mengimplementasikan EMS berbasis PZEM-004T pada di Sekolah Darul Hikam untuk memantau sistem satu fasa secara *real-time* [6]. Yuniarto et al. membuktikan efektivitas monitoring tiga fasa menggunakan ESP32 dan PZEM-004T berhasil [7]. Rhesri et al. menunjukkan bahwa platform IoT berbiaya rendah mampu memantau energi tiga fasa pada lingkungan kampus secara kontinu [8]. Penelitian ini memanfaatkan sistem EMS yang telah berjalan untuk menganalisis ketidakseimbangan beban tiga fasa pada panel distribusi Gedung Yayasan Majelis Pendidikan Darul Hikam (MPDH).

Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi kondisi pembebanan pada fasa R, S, dan T, menentukan fasa mana yang dominan, membandingkan hasil pengukuran

dengan konfigurasi MCB pada *single line diagram* (SLD), serta memberikan rekomendasi teknis berbasis data lapangan.

B. METODE PENELITIAN

2.1 Tahapan penelitian

Penelitian ini menggunakan metode observasi dan analisis kuantitatif terhadap data EMS yang telah beroperasi. Tahapan terdiri atas audit awal, pemantauan menggunakan EMS, analisis kondisi tiga fasa, penyusunan evaluasi, dan rekomendasi teknis. Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan penelitian

Audit awal dilakukan melalui studi literatur, wawancara dengan pengelola gedung, observasi langsung pada panel distribusi, dan pemeriksaan SLD. Data yang dikumpulkan meliputi rating MCB *incoming*, pembagian fasa MCB cabang, jenis beban yang terhubung, kondisi fisik panel, serta informasi waktu terjadinya gangguan operasional. Hasil audit awal menjadi dasar pemahaman terhadap konfigurasi distribusi panel sebagai acuan interpretasi pada tahap analisis.

Tahap pemantauan data melalui sistem EMS untuk memperoleh profil beban per fasa. Data yang diperoleh dianalisis untuk mengidentifikasi ketidakseimbangan distribusi, mengevaluasi pembebanan terhadap rating MCB *incoming*, dan menghubungkan pola data EMS dengan temuan audit awal. Hasilnya menjadi dasar penyusunan rekomendasi teknis.

2.2 Lokasi dan objek penelitian

Penelitian dilaksanakan pada panel distribusi listrik utama Gedung Yayasan Majelis Pendidikan Darul Hikam (MPDH), Bandung. Gedung merupakan bangunan pendidikan aktif yang beroperasi setiap hari kerja dengan beban yang bervariasi

2.3 Sistem pengukuran dan pengambilan data

Pengukuran dilakukan menggunakan sistem EMS berbasis IoT yang dikembangkan dari sistem monitoring sebelumnya pada lokasi yang sama . Sistem terdiri atas mikrokontroler ESP32 dan tiga unit sensor PZEM-004T, masing-masing sebagai kanal pengukuran pada fasa R, S, dan T. Setiap unit dilengkapi CT *split-core* yang dipasang melingkari konduktor fasa pada sisi *downstream* MCB *incoming*, sehingga pengukuran mencakup seluruh arus yang mengalir ke beban *downstream* masing-masing fasa secara bersamaan.

Setiap unit PZEM-004T mengukur tegangan fasa-netral, arus, daya aktif, energi aktif, frekuensi, dan faktor daya. Parameter tersebut dibaca ESP32 secara bergantian melalui komunikasi UART, kemudian dikirimkan ke server menggunakan protokol HTTP melalui jaringan Wi-Fi dan ditampilkan melalui *dashboard* berbasis web . Sistem tidak dilengkapi sensor arus pada konduktor netral sehingga arus netral tidak dapat diukur langsung. Pengambilan data dilakukan dengan interval satu menit, mencakup hari kerja dan libur untuk

merepresentasikan variasi pola beban harian.

2.4 Parameter analisis

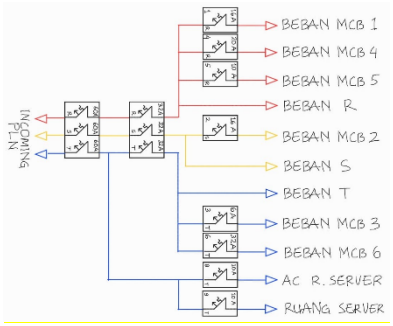
Parameter yang dianalisis meliputi tegangan fasa-netral (V), arus per fasa (A), daya aktif (W), faktor daya, dan frekuensi (Hz). Analisis dilakukan melalui tiga pendekatan: perbandingan nilai antar fasa untuk mengidentifikasi fasa dominan, analisis profil beban untuk mengidentifikasi periode serta karakteristik beban puncak, dan perbandingan arus terukur terhadap rating MCB *incoming* untuk mengevaluasi kondisi pembebanan.

Standar acuan yang penulis gunakan adalah SPLN D5.004-1:2012 untuk batas ketidakseimbangan tegangan sebesar 2% [9], SPLN T6.001:2013 untuk batas tegangan operasional PLN pada rentang 198–242 V [10], IEEE 1159-2019 sebagai acuan pemantauan kualitas daya [5], dan PUIL 2020 sebagai persyaratan instalasi listrik yang berlaku di Indonesia. Selisih arus antar fasa yang melebihi 10% dari nilai rata-rata diidentifikasi sebagai kondisi yang memerlukan perhatian [2].

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Audit Awal

Audit awal dilakukan melalui observasi langsung pada panel distribusi dengan membandingkan kondisi aktual. Diketahui bahwa Panel distribusi menggunakan sistem suplai tiga fasa empat kawat dengan MCB *incoming* 3 × 60 A, melayani beban penerangan, pendingin ruangan, perangkat elektronik, ruang server, dan beban pendukung kegiatan pendidikan lainnya



Gambar 2. Single Line Diagram (SLD)

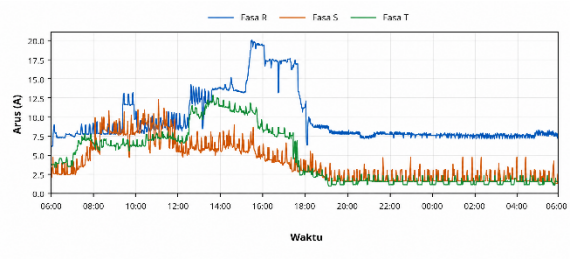
Berdasarkan pemeriksaan SLD pada Gambar 2, distribusi MCB cabang per fasa dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Konfigurasi Panel berdasarkan Audit Awal

Parameter	R	S	T
Jumlah MCB cabang	3	1	4
Total kapasitas MCB cabang (A)	46	16	64
Rating MCB incoming (A)	60	60	60
Warna Kabel	Merah	Kuning	Biru

Fasa T memiliki total kapasitas cabang 64 A yang melampaui rating MCB *incoming* 60 A, sedangkan fasa S hanya memanfaatkan 26,7% dari kapasitas yang tersedia. Distribusi yang tidak proporsional ini merupakan indikasi awal ketidakseimbangan struktural pada konfigurasi panel. Kapasitas MCB cabang mencerminkan batas proteksi, tetapi bukan arus operasi aktual, sehingga kondisi pembebanan riil perlu diverifikasi lebih lanjut menggunakan data arus dari EMS.

3.2 Pemantauan EMS



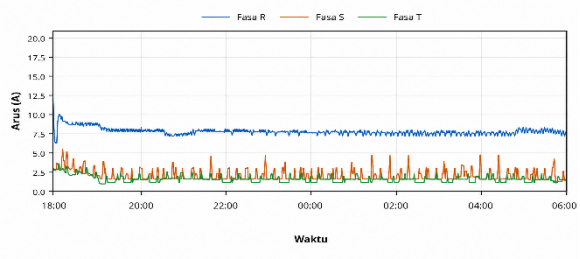
Gambar 3. Pola Arus R-S-T Total

Hasil pemantauan diperoleh data dari fasa R, S, dan T secara bersamaan. Statistik hasil pengukuran selama periode pengamatan ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pemantauan EMS

Parameter	R	S	T
Tegangan rata-rata (V)	242,134	236,683	233,599
Tegangan minimum–maksimum (V)	233,2–248,3	222,0–243,2	225,3–241,2
Arus rata-rata (A)	9,665	4,008	4,616
Arus maksimum (A)	20,006	12,291	12,844
Daya aktif rata-rata (W)	2.216,3	824,9	1.002,4
Faktor daya rata-rata	0,941	0,819	0,924

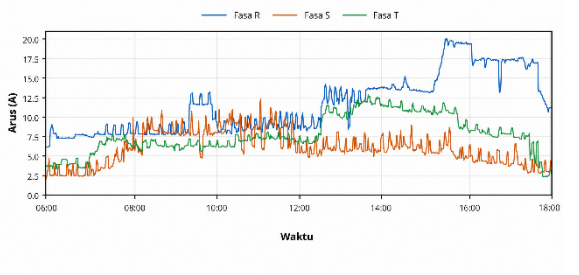
Profil arus ketiga fasa selama periode pengamatan penuh ditampilkan pada Gambar 3.Fasa R secara konsisten mencatat arus tertinggi sepanjang seluruh periode, baik pada jam operasional maupun di luar jam operasional.



Gambar 4. Pola Arus R-S-T Malam Hari

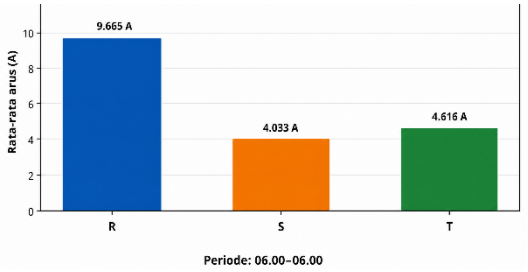
Kondisi malam hari ditampilkan pada Gambar 4. Fasa R stabil di kisaran 7–9 A, sedangkan fasa S dan T bergerak di bawah 3 A dengan pola intermiten. Ketidakseimbangan pada periode ini lebih mencolok karena fasa R menanggung hampir seluruh beban yang masih aktif.

Profil arus pada jam operasional ditampilkan pada Gambar 5.



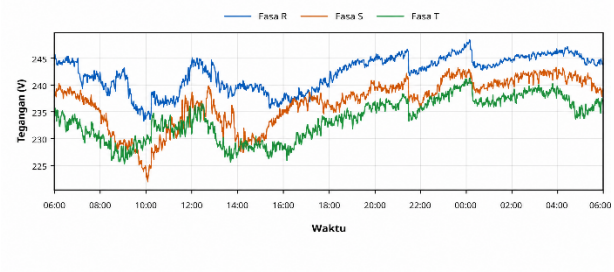
Gambar 5. Pola Arus R-S-T Siang Hari

Ketiga fasa menunjukkan aktivitas yang lebih merata dibandingkan malam hari, meskipun fasa R tetap dominan. Lonjakan tajam fasa R kembali terjadi mulai pukul 15.00 hingga mendekati 20 A, yang tidak diikuti fasa S maupun T secara proporsional.



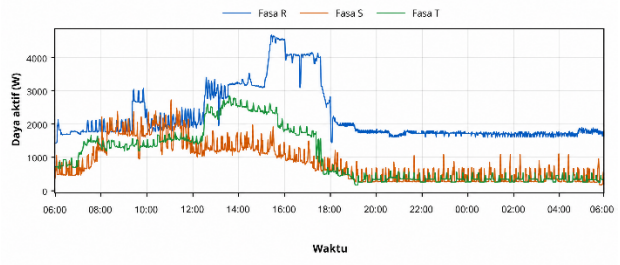
Gambar 6. Arus rata-rata R-S-T

Profil rata-rata tegangan ketiga fasa ditampilkan pada Gambar 6. Fasa R secara konsisten mencatat tegangan tertinggi dengan rata-rata 242,13 V dan nilai maksimum 248,3 V, diikuti Fasa S dengan rata-rata 236,683 V, dan Fasa T dengan rata-rata 233,599 V. Pola daya aktif pada Gambar 7. mengikuti pola arus, dengan Fasa R mencatat daya aktif rata-rata tertinggi sebesar 2.216,341 W dan sekitar 4.300 W pada periode sore hari.



Gambar 7. Pola Tegangan R-S-T

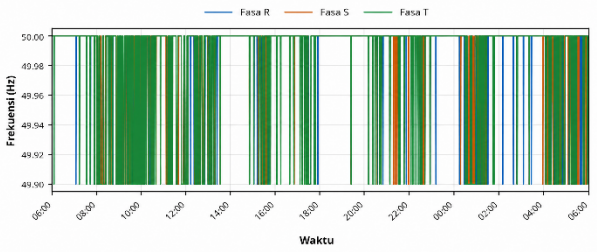
Profil tegangan ketiga fasa ditampilkan pada Gambar 7 Fasa R secara konsisten mencatat tegangan tertinggi dengan rata-rata 242,13 V dan nilai maksimum 248,3 V, diikuti fasa S (236,68 V) dan fasa T (233,60 V).



Gambar 8. Pola Daya Aktif R-S-T

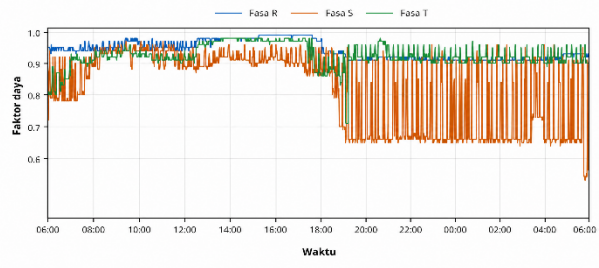
Pola daya aktif pada Gambar 8 mengikuti pola arus, dengan fasa R mencatat daya aktif rata-rata tertinggi sebesar 2.216,3 W dan puncak sekitar 4.300 W pada sore hari.

Frekuensi sistem pada Gambar 10 bergerak bersama untuk ketiga fasa dalam rentang 49,90–50,00 Hz, masih dalam batas toleransi ±5% dari 50 Hz yang ditetapkan PLN.



Gambar 10. Pola Frekuensi R-S-T

Faktor daya pada Gambar 11 menunjukkan nilai mendekati 0,95–1,00 pada jam operasional.



Gambar 11. Pola Faktor Daya R-S-T

Setelah pukul 18.00, fasa T mengalami penurunan dan fluktuasi signifikan hingga 0,544, sementara fasa R relatif stabil di kisaran 0,90–0,95, mencerminkan dominasi beban resistif pada fasa tersebut di luar jam operasional.

3.3 Analisis Kondisi Tiga Fasa

Berdasarkan data pada Tabel 2, fasa R memiliki rata-rata arus 9,665 A, fasa S 4,008 A, dan fasa T 4,616 A. Fasa R merupakan fasa dominan dengan nilai rata-rata sekitar 2,48 kali fasa S dan 2,30 kali fasa T. Dominasi ini tidak hanya terjadi pada rata-rata, tetapi juga pada nilai puncak: arus maksimum fasa R mencapai 20,006

A, sedangkan fasa S dan T masing-masing 12,291 A dan 12,844 A.

Selisih arus rata-rata antara fasa tertinggi dan terendah sebesar 5,762 A. Apabila selisih ini dinyatakan terhadap rata-rata arus tiga fasa sebesar 5,927 A, diperoleh nilai 97,22%. Angka ini bukan indeks ketidakseimbangan menurut definisi standar, melainkan indikator yang menunjukkan bahwa perbedaan pembebanan antar fasa hampir setara dengan nilai rata-rata sistem itu sendiri — kondisi yang mengindikasikan ketidakmerataan pembebanan yang sangat signifikan. Ringkasan indikator ketidakseimbangan ditampilkan pada Tabel 3.

Pola ketidakseimbangan bersifat konsisten dan berulang. Pada malam hari fasa R menanggung beban tetap sekitar 7–9 A sementara fasa S dan T mendekati nol, artinya seluruh beban malam terpusat pada satu fasa. Pada siang hari ketimpangan sedikit berkurang karena fasa S dan T ikut aktif, namun fasa R tetap dominan. Konsistensi pola ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan bersifat struktural, bukan kejadian sesaat.

Perbandingan arus maksimum terhadap rating MCB *incoming* 60 A menunjukkan fasa R mencapai 33,34%, fasa S 20,49%, dan fasa T 21,41%. Nilai-nilai ini masih jauh di bawah rating MCB *incoming*, sehingga data yang tersedia tidak menunjukkan arus lebih sebagai penyebab langsung trip yang dilaporkan.

Tabel 3. Kondisi Aktual Tiga Fasa

Indikator	Hasil aktual
Fasa Arus dominan	R
Rata-rata arus R–S–T	9,664–4,008–4,616 A
Arus maksimum R–S–T	20,006–12,291–12,844 A
Selisih Arus rata-rata	5,762 A
Selisih Arus terhadap rata-rata tiga Fasa	97,22%
MCB incoming	60 A per Fasa
cak terhadap rating MCB R–S–T	33,34%–20,49%–21,41%
Waktu trip MCB	Waktu Operasional

Namun ketidakmerataan yang teridentifikasi tetap berpotensi mempengaruhi keandalan jangka panjang sistem [2]. Karena sensor arus hanya terpasang pada konduktor fasa, arus netral tidak dapat diukur langsung; perbedaan arus yang signifikan antar fasa mengindikasikan bahwa arus netral tidak mendekati nol sebagaimana kondisi seimbang, yang berpotensi menimbulkan rugi-rugi panas pada konduktor netral dan terminal panel secara kontinu.

3.4 Evaluasi

Evaluasi tegangan dilakukan berdasarkan SPLN T6.001:2013 dengan rentang operasional 198–242 V. Fasa R mencatat rata-rata 242,134 V dengan maksimum 248,3 V; sebagian pembacaan melampaui batas atas 242 V terutama pada periode sore dan malam hari sebagaimana terlihat pada Gambar 7. Fasa S dan T secara umum berada dalam rentang standar. Tegangan fasa R yang sebagian melampaui batas atas merupakan temuan independen yang perlu ditindaklanjuti tersendiri, terpisah dari persoalan ketidakseimbangan arus.

Selisih arus antar fasa melebihi 10% dari rata-rata sistem secara konsisten sepanjang periode pengamatan, mengindikasikan kondisi yang memerlukan perhatian berdasarkan acuan yang digunakan

[2]. Fasa R menanggung pembebanan tertinggi pada seluruh periode, dengan beban malam hampir sepenuhnya terpusat pada fasa tersebut. Penurunan faktor daya fasa T hingga 0,544 setelah pukul 18.00 menunjukkan dominasi beban induktif yang tidak aktif penuh, menyebabkan konsumsi daya reaktif yang tidak diperlukan di luar jam operasional.

Terdapat perbedaan antara indikasi awal SLD dengan hasil pengukuran aktual EMS. SLD menunjukkan kapasitas cabang terbesar pada fasa T (64 A), namun data arus aktual menunjukkan fasa R sebagai fasa dominan. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh selisih antara kapasitas proteksi terpasang dengan beban yang benar-benar beroperasi, atau adanya perbedaan antara konfigurasi SLD dengan kondisi fisik panel aktual. Verifikasi ulang konfigurasi panel dan pemetaan beban per jalur perlu dilakukan sebelum tindakan redistribusi diambil.

Berdasarkan data aktual, fasa R merupakan fasa dominan sehingga menjadi jalur utama yang dievaluasi untuk redistribusi. Jalur yang dipindah hendaknya berupa beban satu fasa dengan arus operasi tinggi yang pola penggunaannya dapat ditata ulang, dengan tetap mempertahankan beban penting seperti ruang server. Pemilihan jalur dilakukan dengan mencocokkan grafik arus EMS, SLD, dan pemeriksaan langsung MCB cabang di panel.

3.5 Rekomendasi Teknis

Tabel 4. Evaluasi Redistribusi

Sumber	Jalur yang dievaluasi	Evaluasi	Penyesuaian
Fasa R	Sirkuit AC ruangan	Fasa S	SLD, rating MCB, ukuran penghantar, daya beban
Fasa R	Sirkuit beban terjadwal non-server	Fasa s	Kondisi terminal dan kontinuitas netral

Sebelum redistribusi dilakukan, pemetaan ulang beban aktual per jalur perlu diselesaikan untuk memastikan tindakan yang diambil tepat sasaran. Pelaksanaan mengikuti prosedur keselamatan sesuai PUIL 2020. Setelah perubahan, label panel dan SLD diperbarui, serta dilakukan pemeriksaan kekencangan terminal, ukuran penghantar, rating MCB, dan kontinuitas netral sebelum sistem dioperasikan kembali.

Keberhasilan redistribusi dipantau menggunakan EMS secara berkelanjutan, dengan indikator: menurunnya arus pada fasa dominan, meningkatnya pembebanan fasa tujuan secara proporsional, berkurangnya selisih arus antar fasa, terjaganya tegangan dalam rentang standar, dan tidak munculnya gangguan baru pada sistem.

D. KESIMPULAN

Penelitian membuktikan adanya ketidakseimbangan distribusi beban tiga fasa pada panel Gedung MPDH melalui data IoT EMS. Audit awal menunjukkan kapasitas MCB cabang R, S, dan T masing-masing 46 A, 16 A, dan 64 A terhadap incoming 60 A per fasa, yang mengindikasikan ketidakmerataan struktural dari sisi konfigurasi proteksi.

Data EMS menunjukkan R sebagai fasa dominan dengan arus rata-rata 9,665 A, sedangkan S dan T sebesar 4,008 A dan 4,616 A. Selisih relatif mencapai 97,22% terhadap rata-rata sistem; tegangan R rata-rata 242,130 V dan maksimum 248,3 V, sehingga sebagian pembacaan melampaui batas atas PLN. Arus maksimum masih jauh di bawah MCB incoming 60 A, sehingga penyebab trip belum dapat dikaitkan dengan arus lebih incoming.

Sebelum redistribusi, konfigurasi SLD dan pemetaan beban per jalur harus diverifikasi kembali. Setelah perubahan, EMS dapat digunakan untuk membandingkan profil arus sebelum dan sesudah tindakan serta memastikan sistem tetap aman, andal, dan terpantau secara berkelanjutan. Faktor penyebab gangguan lain di luar arus lebih memerlukan investigasi lanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Ruliyanto, R. (2020). Pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan arus ground pada Trafo 1 dan Trafo 2 pada beban cak sesaat. *Jurnal Ilmiah Giga, 23(1)*.

[2] Wicaksono, G. S., et al. (2023). Evaluasi ketidakseimbangan beban pada GTT 20 kV terhadap arus netral dan rugi daya. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*.

[3] Cahyaningrum, D. P., Triyono, T., & Larasati, P. D. L. (2025). Analisis audit sistem instalasi listrik pada Gedung Sekolah C Politeknik Negeri Semarang. *ORBITH, 21(1)*, 57–64.

[4] Hermawan, A., Mudjiono, M., Wiharya, C., & Seftiana, S. (2021). Analisis keseimbangan beban dan harmonisa di Gedung Graha Polinema Politeknik Negeri Malang. *ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan, 8(3)*.

[5] IEEE. (2019). IEEE Std 1159-2019: IEEE recommended practice for monitoring electric power quality. IEEE Standards Association.

[6] Padmadewi, A. L., Edypoerwa, M. L., Ramadhani, U. H., Mulyadi, Y., & Trisno, B. (2026). Design and implementation of an energy monitoring system at Darul Hikam School. *Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi Terapan (JITTER), 12(2)*. https://doi.org/10.33197/jitter.vol12.iss2.2026.3183

[7] Yuniarto, W., Irman, I., Suparno, S., Rusman, R., Diponegoro, M., & E., E. (2023). Rancang bangun sistem monitoring dan kontrol energi listrik pada beban 3 fasa menggunakan ESP32 berbasis Internet of Things (IoT). *Jurnal Poli-Teknologi, 22(1)*, 30–38. https://doi.org/10.32722/pt.v22i1.5102

[8] Rhesri, A., Aabadi, F., Bennani, R., Ben Maissa, Y., Tamtaoui, A., & Dahmouni, H. (2025). Development of a low-cost Internet of Things platform for three-phase energy monitoring in a university campus. *IoT, 6(2)*, 27. https://doi.org/10.3390/iot6020027

[9] PLN. (2012). SPLN D5.004-1:2012: Persyaratan instalasi listrik. PT PLN (Persero).

[10] PLN. (2013). SPLN T6.001:2013: Tegangan standar. PT PLN (Persero)