

ANALISIS KUALITAS DAYA SEBAGAI INDIKATOR KEANDALAN DAN KESELAMATAN OPERASIONAL SISTEM DISTRIBUSI LISTRIK PADA GEDUNG BERTINGKAT

Muhammad Rivel Zebertavio¹, Priyo Adi Sesotyo², Fahrudin Ahmad³

Universitas Semarang^{1,2,3}
psesotyo@usm.ac.id²

Abstract: *This study aims to evaluate power quality and analyze its impact on the reliability of electrical distribution systems in a high-rise building. The study employed a quantitative descriptive method through field measurements using a Power Quality Analyzer PEL 103 Chauvin Arnoux installed on the distribution panels of ten floors. The observed parameters included voltage, voltage unbalance, current unbalance, power factor, and total harmonic distortion of voltage (THDv) and current (THDi). The results indicate that the voltage level (229.18–235.02 V), voltage unbalance (0.31–1.17%), power factor (0.86–0.99), and THDv (<5%) comply with IEC 61000, SNI IEC 61000, Permen ESDM No. 04 of 2009, and IEEE 519-2014/2022 standards. However, current unbalance exceeded the permissible limit of 20% on seven floors, and THDi values on several floors exceeded 15%, indicating the presence of nonlinear loads. It can be concluded that the electrical distribution system of the high-rise building exhibits good voltage stability; however, load balancing among phases and harmonic mitigation measures are necessary to maintain the long-term reliability and safety of the electrical installation.*

Keywords: *Electrical Distribution, Harmonics, High-Rise Building, Power Factor, Power Quality.*

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kualitas daya dan menganalisis dampaknya terhadap keandalan sistem distribusi listrik pada sebuah gedung bertingkat. Metode yang digunakan adalah metode deskriptif kuantitatif melalui pengukuran lapangan menggunakan Power Quality Analyzer PEL 103 Chauvin Arnoux yang dipasang pada panel distribusi di sepuluh lantai gedung. Parameter yang diamati meliputi tegangan, ketidakseimbangan tegangan, ketidakseimbangan arus, faktor daya, serta total distorsi harmonisa tegangan (THDv) dan arus (THDi). Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter tegangan (229,18–235,02 V), ketidakseimbangan tegangan (0,31–1,17%), faktor daya (0,86–0,99), dan THDv (<5%) telah memenuhi standar IEC 61000, SNI IEC 61000, Permen ESDM Nomor 04 Tahun 2009, dan IEEE 519-2014/2022. Namun, ketidakseimbangan arus melebihi batas yang diizinkan sebesar 20% pada tujuh lantai dan nilai THDi pada beberapa lantai melebihi 15% yang mengindikasikan adanya beban nonlinier. Simpulan penelitian ini menunjukkan bahwa sistem distribusi listrik gedung bertingkat memiliki stabilitas tegangan yang baik, namun diperlukan upaya penyeimbangan beban antar fasa dan mitigasi harmonisa untuk menjaga keandalan dan keselamatan instalasi listrik dalam jangka panjang.

Kata kunci: Distribusi Listrik, Faktor Daya, Gedung Bertingkat, Harmonisa, Kualitas Daya.

PENDAHULUAN

Kualitas daya listrik (*power quality*) merupakan salah satu parameter penting yang menentukan performa dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik modern. Kualitas daya yang baik mampu menjamin kontinuitas pasokan energi listrik, meningkatkan efisiensi penggunaan energi, serta menjaga

kinerja peralatan listrik agar tetap beroperasi secara optimal (Nasrul & Firmansyah, 2015). Sistem distribusi listrik pada gedung bertingkat umumnya melayani berbagai jenis beban, seperti sistem pencahayaan, pendingin udara, lift, pompa, komputer, dan berbagai peralatan elektronik lainnya yang memiliki karakteristik pembebanan yang beragam (Silva et al.,

2019). Seiring dengan meningkatnya penggunaan peralatan berbasis elektronika daya, potensi terjadinya gangguan kualitas daya listrik juga semakin meningkat (Duc et al., 2023).

Gangguan kualitas daya listrik dapat berupa penurunan atau kenaikan tegangan, faktor daya rendah, ketidakseimbangan beban, serta munculnya harmonisa akibat penggunaan beban nonlinier. Kondisi tersebut dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya, penurunan efisiensi energi, mempercepat degradasi peralatan listrik, dan meningkatkan biaya operasional sistem tenaga listrik (Mahmud et al., 2019). Oleh karena itu, evaluasi kualitas daya listrik menjadi salah satu upaya penting dalam menjaga keandalan dan keselamatan sistem distribusi tenaga listrik.

Faktor daya merupakan salah satu indikator utama yang digunakan untuk menilai efisiensi pemanfaatan energi listrik pada sistem distribusi tenaga listrik. Nilai faktor daya yang rendah menyebabkan meningkatnya kebutuhan daya reaktif sehingga memperbesar arus yang mengalir pada penghantar distribusi (Pawawoi et al., 2020). Kondisi tersebut dapat meningkatkan rugi-rugi daya dan menurunkan efisiensi sistem tenaga listrik secara keseluruhan (Widyastuti & Wisnuaji, 2019).

Selain faktor daya, ketidakseimbangan beban antar fasa merupakan salah satu permasalahan yang sering ditemukan pada sistem distribusi tenaga listrik gedung bertingkat. Penelitian yang dilakukan oleh Syamsiana et al. (2025) menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban dapat melebihi batas yang direkomendasikan pada beberapa sistem distribusi tenaga

listrik. Ketidakseimbangan beban menyebabkan munculnya arus netral yang cukup besar sehingga meningkatkan rugi-rugi daya pada penghantar dan transformator distribusi (Antic et al., 2021). Kondisi tersebut juga dapat meningkatkan temperatur operasi peralatan listrik dan mempercepat proses degradasi komponen distribusi (Ciontea & Iov, 2021).

Permasalahan lain yang sering ditemukan pada sistem distribusi tenaga listrik adalah harmonisa. Harmonisa merupakan distorsi gelombang arus atau tegangan yang dihasilkan oleh penggunaan beban nonlinier, seperti *variable speed drive*, komputer, *switching power supply*, dan peralatan elektronika daya lainnya. Kualitas daya listrik yang buruk akibat harmonisa memiliki hubungan yang erat dengan tingkat keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Harmonisa dapat meningkatkan rugi-rugi energi serta memperbesar kemungkinan terjadinya gangguan operasi pada sistem distribusi tenaga listrik (Ghorbani & Mokhtari, 2015). Penelitian yang dilakukan oleh Razmi et al. (2023) menunjukkan bahwa kualitas daya yang buruk dapat mengurangi umur pakai peralatan listrik akibat peningkatan temperatur operasi dan gangguan tegangan yang terjadi secara berulang.

Selain mempengaruhi keandalan, kualitas daya listrik juga berkaitan erat dengan aspek keselamatan instalasi listrik. Kandungan harmonisa yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan temperatur transformator dan mempercepat degradasi sistem isolasi (Ali et al., 2024). Kondisi pembebanan berlebih (*overload*) yang terjadi secara terus-menerus juga dapat meningkatkan risiko kegagalan transformator

distribusi dan peralatan listrik lainnya (Dong et al., 2019). Apabila kondisi tersebut tidak dikendalikan dengan baik, maka risiko terjadinya gangguan kelistrikan dan kebakaran pada instalasi listrik akan semakin meningkat.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji kualitas daya listrik pada sistem distribusi gedung maupun industri. Syamsiana et al. (2025) melaporkan bahwa ketidakseimbangan beban dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya dan penurunan efisiensi energi. Razmi et al. (2023) menunjukkan bahwa harmonisa yang tinggi berpotensi mempercepat kerusakan peralatan listrik akibat peningkatan temperatur operasi. Silva et al. (2019) menyatakan bahwa penggunaan beban nonlinier pada bangunan bertingkat dapat menurunkan kualitas daya dan meningkatkan risiko gangguan pada sistem distribusi listrik. Namun, sebagian besar penelitian tersebut hanya berfokus pada satu atau dua parameter kualitas daya dan belum mengintegrasikan berbagai parameter kualitas daya sebagai indikator untuk mengevaluasi keandalan dan keselamatan sistem distribusi listrik pada gedung bertingkat.

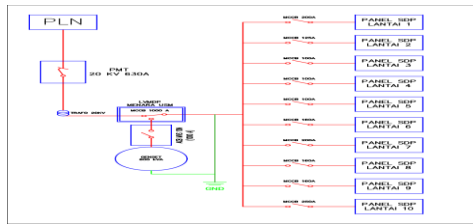
Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini memiliki kebaruan (*novelty*) berupa evaluasi kualitas daya listrik secara komprehensif dengan mengintegrasikan parameter tegangan, ketidakseimbangan tegangan, ketidakseimbangan arus, faktor daya, serta total distorsi harmonisa tegangan dan arus untuk menganalisis pengaruhnya terhadap keandalan dan keselamatan sistem distribusi listrik pada gedung bertingkat. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis yang lebih menyeluruh dalam upaya peningkatan

efisiensi energi, keandalan operasi, dan keselamatan instalasi listrik.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kualitas daya listrik berdasarkan parameter tegangan, ketidakseimbangan tegangan, ketidakseimbangan arus, faktor daya, serta total distorsi harmonisa pada sistem distribusi tenaga listrik gedung bertingkat dan menganalisis dampaknya terhadap keandalan serta keselamatan instalasi listrik. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar dalam penyusunan rekomendasi teknis untuk meningkatkan kinerja sistem distribusi tenaga listrik pada bangunan bertingkat.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif deskriptif untuk menganalisis kualitas daya listrik sebagai indikator keandalan dan keselamatan sistem distribusi kelistrikan pada gedung bertingkat. Objek penelitian merupakan sistem distribusi tenaga listrik yang memperoleh suplai daya dari jaringan PLN melalui transformator distribusi dan selanjutnya didistribusikan melalui *Low Voltage Main Distribution Panel* (LVMDP) menuju panel-panel *Sub Distribution Panel* (SDP) pada setiap lantai gedung. Selain sumber utama dari PLN, sistem distribusi juga dilengkapi dengan genset berkapasitas 600 kVA sebagai sumber daya cadangan ketika terjadi gangguan pada jaringan utama. Konfigurasi sistem distribusi yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 1**.

**Gambar 1.**

Single Line Diagram sistem distribusi listrik gedung bertingkat.

Tahapan penelitian diawali dengan identifikasi sistem distribusi listrik untuk menentukan titik pengukuran serta memahami karakteristik pembebanan pada setiap panel distribusi. Setelah itu dilakukan pemasangan *Power & Energy Logger* PEL103 Chauvin Arnoux pada panel distribusi yang menjadi objek pengukuran dan dipasang selama 15 menit dengan beban penuh. Alat ini digunakan untuk merekam parameter kualitas daya listrik secara kontinu selama periode pengamatan sehingga diperoleh data kondisi aktual sistem distribusi listrik pada saat beroperasi. Parameter yang diukur meliputi tegangan, arus, frekuensi, daya aktif, daya reaktif, daya semu, faktor daya, energi listrik, serta profil pembebanan sistem. Data hasil pengukuran direkam secara otomatis oleh PEL103 dan kemudian diunduh ke komputer untuk dilakukan pengolahan dan analisis lebih lanjut. Tahapan penelitian mulai dari identifikasi sistem, pemasangan alat ukur, akuisisi data, pengolahan data, analisis kualitas daya, evaluasi hasil, hingga penyusunan kesimpulan dan rekomendasi ditunjukkan pada **Gambar 2**.

**Gambar 2.**

Diagram alur proses pengukuran kualitas kelistrikan menggunakan *Chauvin Arnoux* PEL103

Analisis kualitas daya listrik dilakukan berdasarkan parameter tegangan, arus, faktor daya, harmonisa, dan ketidakseimbangan beban antar fasa. Arus rata-rata tiga fasa dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$I_{avg} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (1)$$

Dengan I_{avg} merupakan arus rata-rata, sedangkan I_R , I_S , dan I_T masing-masing merupakan arus pada fasa R, S, dan T. Persentase ketidakseimbangan arus dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$\%Unbalance = \frac{\Delta I_{maks}}{I_{avg}} \times 100\% \quad (2)$$

Dengan ΔI_{maks} merupakan deviasi arus maksimum terhadap arus rata-rata. Selanjutnya faktor daya dianalisis menggunakan Persamaan (3).

$$PF = \frac{P}{S} \quad (3)$$

Dengan PF merupakan faktor daya, P adalah daya aktif (kW), dan S adalah daya semu (kVA). Untuk mengetahui daya aktif sistem tiga fasa digunakan Persamaan (4).

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \quad (4)$$

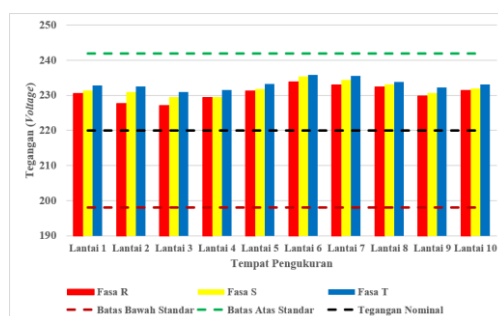
Dengan V merupakan tegangan saluran, I adalah arus saluran, dan $\cos \phi$ merupakan faktor daya. Hasil analisis kualitas daya listrik kemudian digunakan untuk mengevaluasi keandalan dan keselamatan sistem

distribusi. Evaluasi keandalan dilakukan berdasarkan kestabilan tegangan, faktor daya, tingkat pembebanan, dan ketidakseimbangan beban antar fasa. Sementara itu, evaluasi keselamatan dilakukan dengan meninjau potensi terjadinya *overheating*, *overload*, peningkatan rugi-rugi daya, serta kesesuaian kapasitas penghantar dan peralatan proteksi terhadap kondisi pembebanan aktual. Tahap akhir penelitian dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap standar yang berlaku sehingga dapat ditentukan tingkat kualitas daya listrik, keandalan, dan keselamatan sistem distribusi. Berdasarkan hasil evaluasi tersebut disusun kesimpulan dan rekomendasi teknis sebagai upaya peningkatan kinerja sistem distribusi tenaga listrik pada gedung bertingkat.

HASIL PENELITIAN

Hasil Pengukuran Tegangan dan Ketidakseimbangan Tegangan

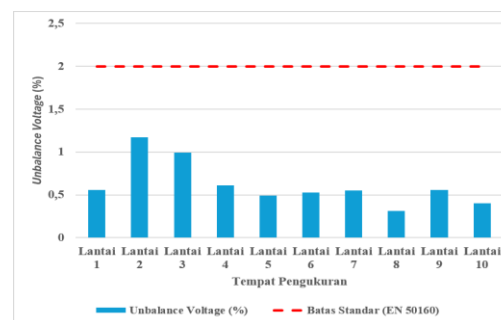
Berdasarkan hasil pengukuran, nilai tegangan pada seluruh titik pengukuran berada dalam rentang 227,10–235,89 V. Nilai tegangan rata-rata tertinggi ditemukan pada Lantai 6 sebesar 235,02 V, sedangkan nilai tegangan rata-rata terendah terdapat pada Lantai 3 sebesar 229,18 V. Seluruh nilai tegangan yang terukur masih berada dalam rentang standar tegangan 220 V $\pm$ 10%, yaitu antara 218,5 V hingga 241,5 V.



Gambar 3.

Profil Tegangan Tiga Fasa pada Setiap Titik Pengukuran

Gambar 3 menunjukkan profil tegangan fasa R, S, dan T pada setiap titik pengukuran. Secara umum, seluruh lantai memiliki pola distribusi tegangan yang relatif seragam. Nilai tegangan fasa T cenderung sedikit lebih tinggi dibandingkan fasa R dan S, namun perbedaannya tidak signifikan.



Gambar 4.

Persentase Ketidakseimbangan Tegangan pada Setiap Titik Pengukuran

Gambar 4 menunjukkan persentase ketidakseimbangan tegangan pada setiap titik pengukuran. Nilai ketidakseimbangan tegangan berada pada rentang 0,31% hingga 1,17%. Nilai tertinggi ditemukan pada Lantai 2 sebesar 1,17%, sedangkan nilai terendah terdapat pada Lantai 5 sebesar 0,31%.

Berdasarkan standar EN 50160, batas maksimum ketidakseimbangan tegangan adalah sebesar 2%. Seluruh lokasi pengukuran menunjukkan nilai ketidakseimbangan tegangan yang masih berada di bawah batas tersebut.

Secara keseluruhan, hasil pengukuran menunjukkan bahwa sistem distribusi listrik gedung bertingkat mampu mempertahankan kualitas tegangan yang baik dan memiliki tingkat ketidakseimbangan tegangan

yang rendah pada seluruh titik pengukuran.

Hasil Pengukuran Arus dan Ketidakseimbangan Arus

Arus merupakan salah satu parameter penting dalam sistem distribusi tenaga listrik karena menggambarkan tingkat pembebanan yang diterima oleh setiap fasa. Selain menentukan besarnya daya yang disalurkan kepada beban, distribusi arus yang seimbang pada sistem tiga fasa juga berpengaruh terhadap efisiensi energi, keandalan peralatan, serta keselamatan instalasi listrik. Oleh karena itu, analisis arus dan ketidakseimbangan arus dilakukan untuk mengevaluasi kondisi pembebanan pada sistem distribusi listrik gedung bertingkat dan

mengidentifikasi potensi gangguan yang dapat memengaruhi performa sistem secara keseluruhan.

Berdasarkan hasil pengukuran yang ditunjukkan pada Tabel 1, nilai arus pada setiap lantai menunjukkan variasi yang cukup besar. Arus rata-rata tertinggi ditemukan pada Lantai 7 sebesar 33,91 A, sedangkan arus rata-rata terendah terdapat pada Lantai 1 sebesar 6,63 A. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa karakteristik dan jumlah beban listrik yang terhubung pada masing-masing lantai tidak seragam. Variasi pembebanan ini merupakan kondisi yang umum terjadi pada gedung bertingkat karena setiap lantai memiliki fungsi, jumlah peralatan listrik, dan pola penggunaan energi yang berbeda.

Tabel 1.
Hasil Analisis Arus dan Ketidakseimbangan Arus

Lokasi	Arus				Current Unbalance (%)	Standar Unbalance (%)	Status
	R	S	T	Rata - Rata			
Lantai 1	10,14	9,74	0,00	6,63	100,00	≤ 20	Tidak Sesuai
Lantai 2	31,75	16,93	17,92	22,20	43,29	≤ 20	Tidak Sesuai
Lantai 3	17,40	18,58	22,94	19,64	16,79	≤ 20	Sesuai
Lantai 4	31,55	32,49	26,86	30,30	16,88	≤ 20	Sesuai
Lantai 5	14,61	12,75	16,63	14,66	21,45	≤ 20	Tidak Sesuai
Lantai 6	17,47	3,38	12,54	11,13	69,47	≤ 20	Tidak Sesuai
Lantai 7	34,99	34,66	32,09	33,91	5,66	≤ 20	Sesuai
Lantai 8	29,59	24,92	43,05	32,52	32,49	≤ 20	Tidak Sesuai
Lantai 9	38,07	32,21	21,48	30,59	29,63	≤ 20	Tidak Sesuai
Lantai 10	19,52	17,72	22,96	20,07	21,78	≤ 20	Tidak Sesuai

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai ketidakseimbangan arus berada pada rentang 5,66% hingga 100%. Nilai ketidakseimbangan arus tertinggi ditemukan pada Lantai 1 sebesar 100%, sedangkan nilai terendah terdapat pada Lantai 7 sebesar 5,66%.

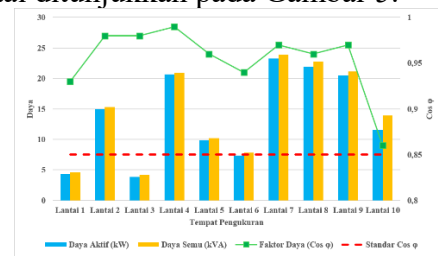
Berdasarkan standar IEEE, batas maksimum ketidakseimbangan arus adalah sebesar 20%. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa hanya tiga lantai yang memenuhi standar, yaitu; 1) Lantai 3 sebesar 16,79%; 2) Lantai 4 sebesar 16,88%; 3) Lantai 7 sebesar 5,66%.

Sementara itu, tujuh lantai lainnya memiliki nilai ketidakseimbangan arus yang melebihi batas standar sehingga dikategorikan tidak memenuhi persyaratan. Kondisi paling kritis ditemukan pada Lantai 1, di mana arus pada fasa T bernilai 0 A, sedangkan arus pada fasa R dan S masing-masing sebesar 10,14 A dan 9,74 A. Selain itu, Lantai 6 memiliki nilai ketidakseimbangan arus sebesar 69,47%, di mana arus pada fasa S hanya sebesar 3,38 A, jauh lebih rendah dibandingkan arus pada fasa R sebesar 17,47 A dan fasa T sebesar 12,54 A. Secara keseluruhan, hasil pengukuran menunjukkan bahwa ketidakseimbangan arus merupakan salah satu permasalahan utama pada sistem distribusi listrik gedung bertingkat. Dari sepuluh lokasi pengukuran, tujuh lokasi tidak memenuhi standar ketidakseimbangan arus sebesar 20%.

Hasil Pengukuran Faktor Daya

Faktor daya merupakan salah satu parameter penting dalam evaluasi kualitas daya listrik karena menunjukkan tingkat efektivitas pemanfaatan energi listrik yang disuplai oleh sistem. Faktor daya didefinisikan

sebagai perbandingan antara daya aktif (kW) dan daya semu (kVA). Nilai faktor daya yang mendekati satu menunjukkan bahwa sebagian besar energi listrik yang disuplai dapat dimanfaatkan sebagai daya aktif, sedangkan daya reaktif yang beredar dalam sistem relatif kecil. Hasil pengukuran faktor daya pada setiap lantai ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5.

Perbandingan daya aktif, daya semu, dan faktor daya pada setiap lantai.

Berdasarkan Gambar 5, nilai faktor daya pada seluruh lantai berada pada rentang 0,86 hingga 0,99. Nilai faktor daya tertinggi ditemukan pada Lantai 4 sebesar 0,99, sedangkan nilai terendah terdapat pada Lantai 10 sebesar 0,86. Seluruh nilai faktor daya masih berada di atas batas minimum sebesar 0,85 sehingga memenuhi standar yang berlaku.

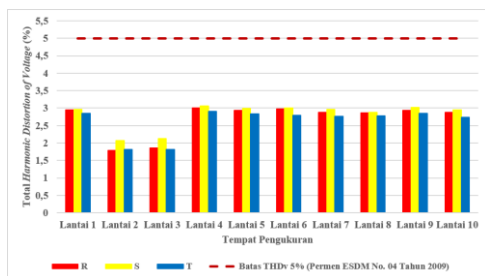
Selain itu, perbandingan antara daya aktif dan daya semu pada setiap lantai menunjukkan selisih yang relatif kecil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa proporsi daya aktif yang digunakan oleh beban relatif besar dibandingkan daya reaktif yang beredar dalam sistem.

Secara keseluruhan, hasil pengukuran menunjukkan bahwa sistem distribusi listrik gedung bertingkat telah beroperasi dengan tingkat efisiensi yang baik karena seluruh nilai faktor daya memenuhi batas minimum yang dipersyaratkan.

Hasil Pengukuran THD (Total Harmonic Distortion)

Harmonisa merupakan salah satu indikator penting dalam evaluasi kualitas daya listrik karena dapat memengaruhi efisiensi energi, keandalan sistem distribusi, dan umur pakai peralatan listrik. Harmonisa muncul akibat penggunaan beban nonlinier yang menyebabkan bentuk gelombang arus maupun tegangan menyimpang dari gelombang sinusoidal ideal. Pada gedung bertingkat, sumber harmonisa umumnya berasal dari komputer, lampu LED, UPS, inverter, *variable speed drive* (VSD), serta berbagai peralatan elektronika daya lainnya yang beroperasi secara bersamaan.

Tingkat harmonisa pada sistem tenaga listrik dinyatakan menggunakan parameter Total Harmonic Distortion Voltage (THDv) dan Total Harmonic Distortion Current (THDi). Hasil pengukuran THDv dan THDi ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.

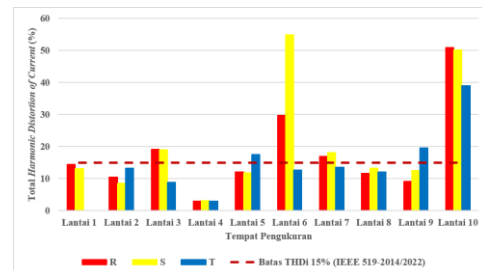


Gambar 6.

Nilai THDv pada setiap lantai dibandingkan dengan batas standar Permen ESDM No. 04 Tahun 2009.

Berdasarkan Gambar 6, nilai THDv pada seluruh lantai berada pada rentang 1,79% hingga 3,06%. Nilai THDv tertinggi ditemukan pada Lantai 4 sebesar 3,06%, sedangkan nilai terendah terdapat pada Lantai 2 sebesar

1,89%. Seluruh nilai THDv masih berada di bawah batas maksimum 5% sesuai Permen ESDM Nomor 04 Tahun 2009.



Gambar 7.

Nilai THDi pada setiap lantai dibandingkan dengan batas standar IEEE 519-2014/2022.

Berbeda dengan harmonisa tegangan, hasil pengukuran harmonisa arus menunjukkan kondisi yang lebih bervariasi dan cenderung menjadi permasalahan utama pada sistem distribusi listrik gedung. Berdasarkan **Gambar 7**, nilai THDi berada pada rentang 3,00% hingga 46,68%. Nilai THDi tertinggi ditemukan pada Lantai 10 sebesar 46,68%, sedangkan nilai terendah terdapat pada Lantai 4 sebesar 3,00%.

Berdasarkan standar IEEE 519-2014/2022 dengan batas maksimum THDi sebesar 15%, hanya tiga lokasi yang memenuhi standar, yaitu Lantai 3 sebesar 15,29%, Lantai 6 sebesar 32,41%, Lantai 7 sebesar 16,24%, dan Lantai 10 sebesar 46,68%. Secara keseluruhan, sebagian besar lokasi pengukuran menunjukkan nilai THDi yang melebihi batas standar.

Tingginya nilai THDi menunjukkan adanya dominasi beban nonlinier yang menghasilkan arus harmonisa dalam jumlah besar. Kondisi ini umumnya disebabkan oleh penggunaan komputer, UPS, inverter, lampu LED, *switching power supply*, dan berbagai peralatan elektronika daya

yang banyak digunakan pada gedung bertingkat.

PEMBAHASAN

Pembahasan Tegangan dan Ketidakseimbangan Tegangan

Secara umum, profil tegangan pada seluruh lantai menunjukkan distribusi yang relatif merata. Selisih antara tegangan rata-rata tertinggi dan terendah hanya sebesar 5,84 V atau sekitar 2,54% dari tegangan nominal sistem. Kondisi ini menunjukkan bahwa rugi-rugi tegangan (*voltage drop*) yang terjadi pada jaringan distribusi internal gedung masih relatif kecil.

Stabilitas tegangan yang baik sangat penting karena fluktuasi tegangan yang berlebihan dapat menyebabkan penurunan efisiensi, gangguan operasi, hingga mempercepat kerusakan peralatan listrik yang sensitif terhadap perubahan tegangan. Oleh karena itu, hasil pengukuran ini mengindikasikan bahwa kualitas sistem distribusi listrik gedung bertingkat masih mampu menyediakan suplai daya yang stabil sesuai dengan standar yang ditetapkan.

Selain evaluasi terhadap profil tegangan, kualitas daya juga dianalisis melalui parameter ketidakseimbangan tegangan (*voltage unbalance*). Ketidakseimbangan tegangan terjadi ketika nilai tegangan pada masing-masing fasa tidak sama sehingga menyebabkan distribusi daya yang tidak merata pada sistem tiga fasa. Besarnya ketidakseimbangan tegangan dipengaruhi oleh distribusi beban antar fasa, karakteristik penghantar, serta kondisi sistem distribusi yang digunakan.

Rendahnya nilai ketidakseimbangan tegangan menunjukkan bahwa pembagian beban

antar fasa R, S, dan T berlangsung relatif merata. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sistem distribusi listrik gedung memiliki kualitas penyaluran daya yang baik dan mampu mendistribusikan energi listrik secara seimbang ke setiap fasa.

Tegangan yang seimbang akan menghasilkan kondisi operasi yang lebih stabil pada peralatan listrik tiga fasa, seperti motor induksi, transformator, dan sistem pendingin yang banyak digunakan pada gedung bertingkat. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Oluseyi et al. (2022) yang menunjukkan bahwa peningkatan ketidakseimbangan tegangan dapat menyebabkan penurunan efisiensi motor induksi secara signifikan. Penelitian tersebut melaporkan bahwa efisiensi motor menurun dari 93,2% pada kondisi tegangan seimbang menjadi 95,51% ketika ketidakseimbangan tegangan mencapai 3%.

Dari aspek keandalan, nilai ketidakseimbangan tegangan yang rendah menunjukkan bahwa sistem distribusi masih memiliki kemampuan yang baik dalam mempertahankan kualitas suplai listrik pada berbagai kondisi pembebanan. Aderibigbe et al. (2017) menyatakan bahwa ketidakseimbangan tegangan dapat memberikan dampak negatif terhadap performa motor, kualitas daya, dan keandalan sistem tenaga listrik. Ketika ketidakseimbangan tegangan meningkat, arus pada salah satu fasa akan cenderung lebih besar sehingga dapat menyebabkan peningkatan temperatur operasi dan mempercepat penurunan umur peralatan.

Selain mempengaruhi keandalan, ketidakseimbangan tegangan juga berkaitan erat dengan

aspek keselamatan sistem distribusi. Rafi et al. (2020) melaporkan bahwa ketidakseimbangan tegangan dapat meningkatkan arus netral dan menimbulkan berbagai permasalahan keselamatan pada sistem distribusi tenaga listrik. Aderibigbe et al. (2017) juga menunjukkan bahwa ketidakseimbangan tegangan dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya dan mempercepat degradasi peralatan listrik akibat kenaikan temperatur operasi. Kondisi tersebut dapat meningkatkan risiko kegagalan peralatan, kerusakan isolasi, dan gangguan operasional apabila terjadi dalam jangka waktu yang lama.

Namun demikian, seluruh nilai ketidakseimbangan tegangan yang diperoleh pada penelitian ini masih berada di bawah batas maksimum 2% yang direkomendasikan oleh EN 50160 sehingga potensi risiko tersebut diperkirakan masih sangat kecil.

Temuan penelitian ini juga didukung oleh Antic et al. (2021) yang menyatakan bahwa peningkatan ketidakseimbangan dapat berdampak negatif terhadap sistem tenaga listrik secara keseluruhan, sedangkan distribusi tegangan yang seimbang mampu meningkatkan efisiensi sistem dan memperpanjang umur pakai peralatan listrik. Tan et al. (2018) melaporkan bahwa pengoperasian sistem tenaga pada kondisi tegangan sesuai standar dapat menghasilkan penghematan energi pada berbagai jenis beban. Selain itu, Elphick et al. (2024) menunjukkan bahwa kualitas tegangan yang baik berkontribusi terhadap peningkatan umur pakai peralatan listrik dan pengurangan biaya operasional akibat kerusakan peralatan.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa parameter

tegangan dan ketidakseimbangan tegangan pada sistem distribusi listrik gedung bertingkat berada dalam kondisi yang sangat baik. Seluruh nilai tegangan masih berada pada rentang standar $220\text{ V} \pm 10\%$ berdasarkan IEC 60038, sedangkan seluruh nilai ketidakseimbangan tegangan berada di bawah batas maksimum 2% berdasarkan EN 50160. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem distribusi listrik gedung bertingkat mampu menyediakan suplai daya yang stabil, seimbang, dan aman bagi seluruh beban yang terhubung. Dari aspek kualitas daya, keandalan, dan keselamatan sistem distribusi, parameter tegangan pada gedung bertingkat dapat dikategorikan memenuhi standar serta tidak menunjukkan adanya indikasi gangguan yang berpotensi memengaruhi kinerja sistem kelistrikan gedung.

Pembahasan Arus dan Ketidakseimbangan Arus

Nilai ketidakseimbangan arus yang tinggi menunjukkan bahwa distribusi beban antar fasa belum dilakukan secara merata. Kondisi ini terutama terlihat pada Lantai 1 dan Lantai 6 yang memiliki nilai *current unbalance* masing-masing sebesar 100% dan 69,47%. Ketidakseimbangan tersebut mengindikasikan bahwa sebagian besar beban hanya terhubung pada satu atau dua fasa sehingga distribusi arus menjadi tidak seimbang. Ketidakseimbangan arus dapat meningkatkan rugi-rugi daya pada penghantar dan transformator, memperbesar arus netral, serta menurunkan efisiensi sistem distribusi tenaga listrik. Hasil penelitian ini sejalan dengan Diao et al. (2025) yang menunjukkan bahwa

ketidakseimbangan beban tiga fasa dapat meningkatkan rugi-rugi transformator secara signifikan, bahkan hingga 9,6 kali dibandingkan kondisi pembebanan seimbang. Selain itu, pembebanan yang tidak seimbang juga menyebabkan pemanasan yang tidak merata pada belitan transformator dan mempercepat proses penuaan isolasi.

Temuan tersebut didukung oleh León-Martínez et al. (2023) yang menyatakan bahwa rugi-rugi beban merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi efisiensi dan umur pakai transformator. Selanjutnya, Gouda et al. (2012) menjelaskan bahwa peningkatan temperatur titik panas (*hot spot temperature*) akibat pembebanan yang tidak merata dapat mempercepat penurunan umur transformator dan menurunkan keandalan sistem distribusi. Selain memengaruhi keandalan, ketidakseimbangan arus juga berkaitan erat dengan aspek keselamatan instalasi listrik. Rafi et al. (2020) melaporkan bahwa ketidakseimbangan arus dapat meningkatkan arus netral sehingga menimbulkan kenaikan temperatur penghantar, mempercepat degradasi isolasi, dan meningkatkan risiko kerusakan penghantar maupun transformator distribusi. Hal ini diperkuat oleh Chicco et al. (2014) yang menyatakan bahwa ketidakseimbangan arus dapat menimbulkan tekanan termal (*thermal stress*) dan tekanan mekanis (*mechanical stress*) pada infrastruktur kelistrikan, terutama apabila dikombinasikan dengan beban nonlinier dan harmonisa.

Meskipun sebagian besar lantai menunjukkan ketidakseimbangan arus yang cukup tinggi, Lantai 7 memiliki performa terbaik dengan nilai ketidakseimbangan arus sebesar 5,66%,

yang menunjukkan bahwa distribusi beban antar fasa pada lantai tersebut telah berlangsung secara relatif merata. Sebaliknya, Lantai 1 memerlukan tindakan perbaikan melalui pemindahan sebagian beban dari fasa R dan S menuju fasa T, sedangkan Lantai 6 memerlukan redistribusi beban menuju fasa S. Sementara itu, Lantai 2, Lantai 8, dan Lantai 9 memerlukan penataan ulang kelompok beban satu fasa, sedangkan Lantai 5 dan Lantai 10 dapat diperbaiki melalui penyesuaian minor terhadap distribusi beban. Secara keseluruhan, ketidakseimbangan arus masih menjadi salah satu permasalahan utama pada sistem distribusi listrik gedung bertingkat karena tujuh dari sepuluh lokasi pengukuran belum memenuhi batas standar sebesar 20%. Oleh karena itu, diperlukan redistribusi beban dan pemantauan kualitas daya secara berkala untuk mengurangi rugi-rugi daya, meningkatkan efisiensi energi, memperpanjang umur peralatan, serta meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem distribusi listrik secara keseluruhan.

Pembahasan Faktor Daya

Nilai faktor daya yang tinggi menunjukkan bahwa sebagian besar energi listrik yang disuplai dapat dimanfaatkan secara efektif oleh beban. Semakin kecil selisih antara daya aktif dan daya semu, semakin besar energi listrik yang dapat dimanfaatkan secara langsung oleh beban. Sebaliknya, faktor daya yang rendah menyebabkan peningkatan arus sistem sehingga dapat meningkatkan rugi-rugi daya pada penghantar dan transformator.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Coman et al. (2020) yang menyatakan bahwa peningkatan faktor daya dapat mengurangi

pembebanan pada transformator dan penghantar sehingga rugi-rugi daya pada sistem distribusi dapat diminimalkan. Penelitian tersebut juga menjelaskan bahwa peningkatan faktor daya akan menurunkan arus yang mengalir sehingga kehilangan daya akibat resistansi penghantar dapat ditekan.

Selain itu, Tshivhase et al. (2020) menunjukkan bahwa perbaikan faktor daya dapat meningkatkan kapasitas daya aktif yang tersedia untuk melayani beban sekaligus mengurangi rugi-rugi sistem distribusi tenaga listrik. Selanjutnya, Reiman et al. (2019) menjelaskan bahwa faktor daya jaringan distribusi berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi sistem tenaga secara keseluruhan.

Meskipun seluruh lantai memenuhi batas minimum faktor daya, beberapa lokasi menunjukkan nilai faktor daya yang relatif lebih rendah dibandingkan lantai lainnya, terutama Lantai 10 dengan nilai 0,86. Kondisi ini dapat disebabkan oleh dominasi beban induktif seperti sistem pendingin udara, pompa, maupun peralatan listrik lainnya yang memerlukan daya reaktif lebih besar. Selain itu, keberadaan beban nonlinier juga dapat memengaruhi karakteristik arus dan menurunkan faktor daya sistem.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa sistem distribusi listrik gedung bertingkat memiliki kondisi faktor daya yang baik dengan rentang nilai 0,86–0,99. Seluruh nilai faktor daya telah memenuhi batas minimum yang dipersyaratkan sehingga menunjukkan bahwa pemanfaatan energi listrik berlangsung secara efisien. Faktor daya yang tinggi tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan energi, tetapi juga berkontribusi

terhadap keandalan sistem distribusi melalui pengurangan rugi-rugi daya, penurunan pembebanan transformator, serta peningkatan umur pakai peralatan listrik. Dengan demikian, kondisi faktor daya pada gedung bertingkat dapat dikategorikan baik dan mendukung operasi sistem distribusi yang andal serta efisien.

Pembahasan THD (Total Harmonic Distortion)

Nilai THDv yang relatif rendah menunjukkan bahwa meskipun terdapat berbagai jenis beban nonlinier pada sistem distribusi, pengaruhnya terhadap bentuk gelombang tegangan masih dapat dikendalikan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sistem distribusi dan transformator masih mampu menjaga kestabilan tegangan pada seluruh lantai gedung. Selain itu, seluruh nilai THDv yang berada di bawah batas standar menunjukkan bahwa risiko gangguan akibat distorsi tegangan pada sistem distribusi gedung bertingkat relatif kecil dan belum memberikan dampak yang signifikan terhadap keandalan sistem.

Berbeda dengan harmonisa tegangan, harmonisa arus menunjukkan kondisi yang lebih kritis. Tingginya nilai THDi pada beberapa lantai mengindikasikan dominasi penggunaan beban nonlinier yang menghasilkan distorsi arus cukup besar. Kondisi ini umumnya disebabkan oleh penggunaan komputer, UPS, inverter, lampu LED, *switching power supply*, dan berbagai peralatan elektronika daya lainnya yang banyak digunakan pada gedung bertingkat.

Harmonisa arus yang tinggi dapat memberikan dampak serius terhadap kinerja sistem distribusi tenaga listrik. Penelitian Sesotyoto et al. (2023)

menunjukkan bahwa gangguan kualitas daya akibat harmonisa dapat memengaruhi kinerja peralatan, efisiensi, serta keandalan sistem distribusi. Penelitian Nasrul dan Firmansyah (2015) juga menjelaskan bahwa keberadaan harmonisa arus dapat meningkatkan rugi-rugi daya dan mempercepat penurunan umur transformator.

Dampak harmonisa arus terhadap keandalan sistem juga dijelaskan oleh Mohd Wazir et al. (2025) yang menunjukkan bahwa peningkatan harmonisa dapat mempercepat kenaikan temperatur titik panas (*hot spot temperature*) transformator. Kenaikan temperatur tersebut mempercepat proses penuaan isolasi sehingga mengurangi umur pakai transformator secara signifikan. Temuan tersebut didukung oleh Ali et al. (2024) yang menyatakan bahwa harmonisa meningkatkan rugi-rugi inti dan rugi-rugi belitan transformator sehingga menyebabkan kenaikan temperatur yang tidak normal dan mempercepat kerusakan material isolasi.

Selain memengaruhi keandalan, harmonisa arus yang tinggi juga berpotensi menimbulkan masalah keselamatan pada sistem distribusi listrik. Ali et al. (2024) menjelaskan bahwa pemanasan berlebih akibat harmonisa dapat meningkatkan biaya pemeliharaan, memperbesar kemungkinan kegagalan peralatan, serta menyebabkan gangguan operasional yang tidak terduga. Harmonisa arus juga dapat meningkatkan arus netral, memperbesar temperatur penghantar, serta meningkatkan risiko *overheating* pada panel distribusi dan transformator.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa sistem

distribusi listrik gedung bertingkat memiliki faktor daya yang baik dan harmonisa tegangan yang masih memenuhi standar kualitas daya yang berlaku. Namun, harmonisa arus masih menjadi parameter yang perlu mendapatkan perhatian khusus karena sebagian besar lokasi pengukuran memiliki nilai THDi yang melebihi batas standar IEEE 519-2014/2022. Kondisi ini menunjukkan bahwa kualitas daya listrik pada sistem distribusi gedung bertingkat dipengaruhi oleh distorsi arus akibat penggunaan beban nonlinier.

Oleh karena itu, diperlukan evaluasi lebih lanjut terhadap sumber harmonisa dan penerapan langkah mitigasi, seperti pemasangan filter harmonisa, penataan beban nonlinier, serta pemantauan kualitas daya secara berkala untuk meningkatkan efisiensi energi, memperpanjang umur peralatan, serta menjaga keandalan dan keselamatan sistem distribusi listrik gedung bertingkat.

Pembahasan Evaluasi Keandalan dan Keselamatan Sistem Distribusi Listrik

Berdasarkan hasil pengukuran, parameter tegangan menunjukkan kondisi yang sangat baik. Seluruh titik pengukuran memiliki nilai tegangan yang masih berada dalam rentang standar IEC 60038 sebesar $220\text{ V} \pm 10\%$, dengan nilai rata-rata berkisar antara 229,18 V hingga 235,02 V. Selain itu, nilai ketidakseimbangan tegangan pada seluruh lantai berada pada rentang 0,31%–1,17%, atau masih di bawah batas maksimum 2% berdasarkan EN 50160. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem distribusi listrik gedung bertingkat mampu menjaga kestabilan tegangan dan mendistribusikan daya

secara seimbang pada seluruh titik pengukuran. Temuan ini sejalan dengan Oluseyi et al. (2022) yang menyatakan bahwa tingkat ketidakseimbangan tegangan yang rendah berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi dan performa sistem tenaga listrik. Selain itu, Aderibigbe et al. (2017) menjelaskan bahwa distribusi tegangan yang seimbang berperan penting dalam menjaga kinerja peralatan listrik tiga fasa dan mengurangi dampak negatif terhadap sistem distribusi.

Selain parameter tegangan, hasil pengukuran faktor daya juga menunjukkan kondisi yang baik. Seluruh lantai memiliki faktor daya di atas standar minimum 0,85 dengan rentang 0,86–0,99. Kondisi ini menunjukkan bahwa sebagian besar daya yang disuplai dapat dimanfaatkan sebagai daya aktif sehingga rugi-rugi daya akibat aliran daya reaktif dapat diminimalkan. Hasil ini sejalan dengan Coman et al. (2020) yang menyatakan bahwa peningkatan faktor daya dapat mengurangi pembebanan transformator dan penghantar sehingga rugi-rugi sistem distribusi menjadi lebih rendah. Selain itu, Tshivhase et al. (2020) menjelaskan bahwa perbaikan faktor daya mampu meningkatkan efisiensi distribusi dan menyediakan kapasitas daya aktif yang lebih besar untuk melayani beban. Dengan demikian, dari aspek efisiensi energi dan kualitas daya, sistem distribusi listrik gedung bertingkat dapat dikategorikan memiliki performa yang baik.

Meskipun parameter tegangan dan faktor daya menunjukkan kondisi yang memenuhi standar, hasil analisis arus menunjukkan adanya permasalahan pada distribusi pembebanan antar fasa. Dari sepuluh lokasi pengukuran, hanya tiga lokasi

yang memenuhi standar ketidakseimbangan arus sebesar 20%, sedangkan tujuh lokasi lainnya memiliki nilai ketidakseimbangan arus yang melebihi batas standar. Kondisi paling kritis ditemukan pada Lantai 1 dengan nilai ketidakseimbangan arus mencapai 100% dan Lantai 6 sebesar 69,47%. Tingginya ketidakseimbangan arus menunjukkan bahwa pembebanan pada sistem distribusi belum berlangsung secara merata. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan rugi-rugi daya, memperbesar arus netral, serta meningkatkan temperatur penghantar dan transformator distribusi. Temuan ini sejalan dengan Diao et al. (2025) yang menjelaskan bahwa ketidakseimbangan arus dapat meningkatkan rugi-rugi belitan transformator secara signifikan dan mempercepat proses penuaan isolasi akibat pemanasan yang tidak merata. Selain itu, León-Martínez et al. (2023) menyatakan bahwa peningkatan rugi-rugi akibat ketidakseimbangan beban berpengaruh langsung terhadap efisiensi dan umur operasional transformator, sedangkan Gouda et al. (2012) menjelaskan bahwa peningkatan temperatur titik panas (*hot spot temperature*) akibat pembebanan yang tidak seimbang merupakan salah satu faktor utama yang mempercepat penurunan umur transformator distribusi.

Dari aspek kualitas daya, hasil analisis harmonisa menunjukkan bahwa nilai harmonisa tegangan (THDv) pada seluruh lantai masih berada di bawah batas maksimum 5% sesuai Permen ESDM Nomor 04 Tahun 2009. Kondisi ini menunjukkan bahwa kualitas tegangan pada sistem distribusi masih berada dalam kategori baik dan tidak mengalami distorsi tegangan yang

signifikan. Namun, hasil pengukuran harmonisa arus menunjukkan bahwa beberapa lokasi memiliki nilai THDi melebihi batas standar IEEE 519-2014/2022 sebesar 15%, dengan kondisi paling kritis ditemukan pada Lantai 6 dan Lantai 10. Tingginya harmonisa arus mengindikasikan dominasi beban nonlinier seperti komputer, UPS, inverter, dan lampu LED yang menghasilkan distorsi arus cukup besar. Nasrul dan Firmansyah (2015) menjelaskan bahwa harmonisa arus dapat meningkatkan rugi-rugi daya dan mempercepat penurunan umur transformator. Selain itu, Mohd Wazir et al. (2025) menunjukkan bahwa harmonisa yang tinggi dapat mempercepat kenaikan temperatur titik panas transformator dan mempercepat penuaan isolasi, sedangkan Ali et al. (2024) menyatakan bahwa pemanasan berlebih akibat harmonisa dapat meningkatkan kemungkinan kegagalan peralatan, memperbesar biaya pemeliharaan, dan menurunkan keandalan sistem distribusi.

Dari aspek keselamatan, kombinasi antara ketidakseimbangan arus dan harmonisa arus yang tinggi merupakan parameter yang paling berpotensi menimbulkan risiko pada sistem distribusi listrik gedung bertingkat. Ketidakseimbangan arus dapat meningkatkan arus netral dan menimbulkan pemanasan berlebih pada penghantar, sedangkan harmonisa arus dapat meningkatkan rugi-rugi pada transformator dan mempercepat degradasi isolasi. Rafi et al. (2020) menyatakan bahwa ketidakseimbangan arus yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan arus netral dan menimbulkan permasalahan keselamatan pada sistem distribusi tenaga listrik. Sementara itu, Tang et al.

(2024) menjelaskan bahwa keandalan dan keselamatan sistem distribusi sangat dipengaruhi oleh kemampuan sistem dalam mengendalikan gangguan kualitas daya dan mempertahankan kondisi operasi yang aman.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa sistem distribusi listrik gedung bertingkat berada dalam kondisi yang cukup baik dari aspek kualitas tegangan, faktor daya, dan harmonisa tegangan. Namun, ketidakseimbangan arus dan harmonisa arus masih menjadi parameter dominan yang memengaruhi keandalan dan keselamatan sistem distribusi. Oleh karena itu, diperlukan tindakan perbaikan berupa redistribusi beban antar fasa, pengendalian beban nonlinier, pemasangan filter harmonisa, serta pemantauan kualitas daya secara berkala untuk mengurangi rugi-rugi daya, meningkatkan efisiensi energi, memperpanjang umur peralatan, serta menjaga keandalan dan keselamatan sistem distribusi listrik gedung bertingkat secara berkelanjutan.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis kualitas daya dan evaluasi keandalan serta keselamatan sistem distribusi listrik gedung bertingkat, dapat disimpulkan bahwa parameter tegangan, ketidakseimbangan tegangan, dan faktor daya menunjukkan kondisi yang baik serta memenuhi standar yang berlaku, dengan tegangan berada pada rentang 229,18–235,02 V, ketidakseimbangan tegangan sebesar 0,31%–1,17%, dan faktor daya sebesar 0,86–0,99. Selain itu, nilai THDv pada seluruh lokasi masih berada di bawah batas maksimum 5%, yang menunjukkan bahwa kualitas tegangan sistem masih tergolong baik. Namun,

ketidakseimbangan arus dan harmonisa arus (THDi) masih menjadi permasalahan utama karena tujuh dari sepuluh lokasi pengukuran memiliki ketidakseimbangan arus melebihi batas standar 20% dan beberapa lokasi memiliki nilai THDi di atas batas IEEE 519-2014/2022 sebesar 15%. Kondisi tersebut mengindikasikan adanya pengaruh pembebanan yang tidak merata dan dominasi beban nonlinier yang berpotensi meningkatkan rugi-rugi daya, mempercepat penurunan umur peralatan, serta menurunkan keandalan dan keselamatan sistem distribusi. Oleh karena itu, diperlukan tindakan perbaikan berupa redistribusi beban antar fasa, pengendalian beban nonlinier, pemasangan filter harmonisa, dan pemantauan kualitas daya secara berkala guna meningkatkan efisiensi energi, memperpanjang umur peralatan, serta menjaga keandalan dan keselamatan sistem distribusi listrik gedung bertingkat secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aderibigbe, A., Ogunjuyigbe, A. S. O., Ayodele, R. T., & Samuel, I. A. (2017). The Performance of A 3-Phase Induction Machine Under Unbalance Voltage Regime. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 10(5), 136–143. <https://doi.org/10.25103/jestr.105.17>
- Ali, Z. M., Calasan, M., Jurado, F., & Aleem, S. H. E. A. (2024). Complexities of Power Quality and Harmonic-Induced Overheating in Modern Power Grids Studies: *Challenges and solutions*. *IEEE Access*, 12, 151554–151597. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3477729>
- Antić, T., Capuder, T., & Bolfek, M. (2021). A Comprehensive Analysis of The Voltage Unbalance Factor in PV and EV Rich Non-Synthetic Low Voltage Distribution Networks. *Energies*, 14(1), 117. <https://doi.org/10.3390/en14010117>
- Bharati, A. K., & Ajjarapu, V. (2020). Investigation of Relevant Distribution System Representation with DG for Voltage Stability Margin Assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(3), 2072–2081. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2950132>
- Chicco, G., Corona, F., Porumb, R., & Spertino, F. (2014). Experimental Indicators of Current Unbalance in Building-Integrated Photovoltaic Systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(3), 924–934. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2307491>
- Ciontea, C. I., & Iov, F. (2021). A Study of Load Imbalance Influence on Power Quality Assessment for Distribution Networks. *Electricity*, 2(1), 77–90. <https://doi.org/10.3390/electricity2010005>
- Coman, C. M., Florescu, A., & Oancea, C. D. (2020). Improving the Efficiency and Sustainability of Power Systems Using Distributed Power Factor Correction Methods. *Sustainability*, 12(8), 3134. <https://doi.org/10.3390/su12083134>

- Commission, I. E. (2009). IEC 60038:2009—IEC Standard Voltages. International Electrotechnical Commission.
- Diao, G., Ni, H., Si, W., Gu, Y., & Yang, J. (2025). Multi-Physics Numerical Research in Oil-Immersed Three-Phase Transformer Under Load Unbalance. *Energies*, 18(5), 1217. <https://doi.org/10.3390/en18051217>
- Dong, M., Nassif, A. B., & Li, B. (2019). A Data-Driven Residential Transformer Overloading Risk Assessment Method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(1), 387–396. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2882215>
- Duc, M. L., Bilik, P., & Martinek, R. (2023). Analysis of Factors Affecting Electric Power Quality: PLS-SEM and Deep Learning Neural Network Analysis. *IEEE Access*, 11, 40591–40607. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3268037>
- Elphick, S., Knott, J. C., Drury, G., Langstaff, T., & Robinson, D. A. (2024). Quantifying The Economic Impact of Supply Voltage Magnitude on Consumers. *Energies*, 17(22), 5590. <https://doi.org/10.3390/en17225590>
- Engineers, I. of Electrical and Electronics. (1994). IEEE Std 141-1993: IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants. IEEE.
- Ghorbani, M. J., & Mokhtari, H. (2015). Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 5(1), 166–174. <https://doi.org/10.11591/ijece.v5i1.pp166-174>
- Gouda, O. E., Amer, G. M., & Salem, W. A. A. (2012). Predicting Transformer Temperature Rise and Loss of Life in The Presence of Harmonic Load Currents. *Ain Shams Engineering Journal*, 3(2), 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2012.01.003>
- León-Martínez, V., Peñalvo-López, E., Andrada-Monrós, C., & Sáiz-Jiménez, J. Á. (2023). Load Losses and Short-Circuit Resistances of Distribution Transformers According to IEEE Standard C57.110. *Inventions*, 8(6), 154. <https://doi.org/10.3390/invention8060154>
- Mahmud, M. S., Ishak, S., Razali, M. N., Aziz, M. A. A., & Musa, M. (2019). Grease Quality Issues on Middle Voltage Switchgear: Corrosivity, Resistivity, Safety and Ageing. *IIUM Engineering Journal*, 20(1), 216–228. <https://doi.org/10.31436/iiumej.v20i1.995>
- Mohd Wazir, M. H., Mat Said, D., Md Sapari, N., Mohamed Yunus, M. S., & Mohd Yassin, Z. I. (2025). An Electro-Thermal Modeling of Distribution Transformer for Hottest Spot Evaluation Under Photovoltaic-Induced Harmonics. *International Journal of Renewable Energy Development*, 14(3). <https://doi.org/10.61435/ijred.2025.60959>

- Nasrul, N., & Firmansyah, F. (2015). Harmonics Impact A Rising Due to Loading and Solution ETAP Using The Distribution Substation Transformer 160 Kva At Education And Training Unit PT PLN. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, 5(6), 469–474.
<https://doi.org/10.18517/ijaseit.5.6.603>
- Oluseyi, P. O., Jatto, G. O., Okoro, O. I., & Akinbulire, T. O. (2022). Assessment of The Influence of Voltage Unbalance on Three-Phase Operation of Power System. *Nigerian Journal of Technology*, 40(5), 901–912.
<https://doi.org/10.4314/njt.v40i5.16>
- Pawawoi, A., Zuheldi, Z., Akbar, F., & Nazir, R. (2020). Analysis of Energy Losses Reduction Potential on The Distribution Line of Campus Building Through Electric Power Quality Improvement. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 17(2), 868–876.
<https://doi.org/10.11591/ijeecs.v17.i2.pp868-876>
- Rafi, F. H. M., Hossain, M. J., Rahman, M. S., & Taghizadeh, S. (2020). An Overview of Unbalance Compensation Techniques Using Power Electronic Converters for Active Distribution Systems with Renewable Generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125, 109812.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109812>
- Razmi, D., Lu, T., Papari, B., Akbari, E., Fathi, G., & Ghadamyari, M. (2023). An Overview on Power Quality Issues and Control Strategies for Distribution Networks With The Presence of Distributed Generation Resources. *IEEE Access*, 11, 10308–10325.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3238685>
- Reiman, A. P., Somani, A., Alam, M. J. E., Wang, P., Wu, D., & Kalsi, K. (2019). Power Factor Correction in Feeders with Distributed Photovoltaics Using Residential Appliances As Virtual Batteries. *IEEE Access*, 7, 99115–99122.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928568>
- Seddik, M. S., Eteiba, M. B., & Shazly, J. (2024). Evaluating the Harmonic Effects on The Thermal Performance of A Power Transformer. *Energies*, 17(19), 4871.
<https://doi.org/10.3390/en17194871>
- Sesotyo, P. A., Sulistyo, I. A., & Cahyono, T. D. (2023). Electrical Safety Improvement in Ngaliyan Public Health Facility on Semarang City. *International Conference on Technology, Engineering, and Computing Applications (ICTECA)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/ICTECA60133.2023.10491012>
- Silva, J. I., Sousa, V., Sarmiento, P., Gómez, J. R., Viego, P. R., & Quispe, E. C. (2019). Effects of Power Electronics Devices on The Energy Quality of An Administrative Building. *International Journal of Power Electronics and Drive System*, 10(4), 1951–1960.

- <https://doi.org/10.11591/ijped.v10.i4.pp1951-1960>
- Syamsiana, I. N., Hassidiqi, H., Kusuma, W., Novfowan, A. D., Sumari, A. D. W., & Wiharya, C. (2025). Advanced Load Balancing Techniques Using MIMO Fuzzy Logic: A Panel Distribution Case Study at State Polytechnic of Malang. *MethodsX*, 14, 103197. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103197>
- Tan, J. D., Koh, S. P., Au, M. T., Tiong, S. K., & Ali, K. (2018). Implementation of Voltage Optimization for Sustainable Energy. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 12(1), 341–347. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v12.i1.pp341-347>
- Tang, J., Wooi, C., Tan, W., & Afrouzi, H. N. (2024). Optimisation of The Distribution System Reliability with Shielding and Grounding Design Under Various Soil Resistivities. *Journal of Science & Technology*, 32(3), 1263–1283. <https://doi.org/10.47836/pjst.32.3.15>
- Tshivhase, N., Hasan, A. N., & Shongwe, T. (2020). Proposed Fuzzy Logic System for Voltage Regulation and Power Factor Improvement in Power Systems With High Infiltration of Distributed Generation. *Energies*, 13(16), 4241. <https://doi.org/10.3390/en13164241>
- Widyastuti, C., & Wisnuaji, R. (2019). Analisis Tegangan Tembus Minyak Transformator di PT PLN (Persero) Bogor. *Elektron: Jurnal Ilmiah*, 11, 75–78. <https://doi.org/10.30630/eji.11.2.128>