

STUDI KUALITAS DAYA LISTRIK (*POWER QUALITY*) DI BANGUNAN GEDUNG XYZ

Teguh Wiji Nugroho^{1*}, Ilmawan Mustaqim², Alex Sandria Jaya Wardhana³

^{1,2,3} Universitas Negeri Yogyakarta; Jl. Komojoyo No.21A, Karang Gayam, Caturtunggal, Kec. Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281; Telp/Fax: 0274-586168/0274-565500.

Received: 18 Desember 2024

Accepted: 29 Maret 2025

Published: 14 April 2025

Keywords:

Power quality, harmonics, power factor, load imbalance, power quality analyzer.

Correspondent Email:

teguhwiji.2024@student.uny.ac.id

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kualitas daya listrik di Bangunan Gedung XYZ melalui analisis parameter utama seperti tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya. Pengukuran dilakukan secara langsung pada panel *Main Distribution Panel* (MDP) 33 kVA dan 11 kVA menggunakan instrumen *Power Quality Analyzer*. Metode analisis yang digunakan berfokus pada evaluasi distribusi beban antar fasa, efisiensi pemanfaatan daya, serta identifikasi potensi gangguan operasional akibat ketidakseimbangan beban dan konsumsi daya reaktif. Hasil pengukuran menunjukkan adanya ketidakseimbangan tegangan dan arus yang signifikan antar fasa, serta distribusi daya aktif dan reaktif yang tidak merata, khususnya pada fasa T. Ketimpangan ini berdampak pada tingginya arus netral, peningkatan rugi daya, dan pembebanan berlebih pada salah satu sisi sistem. Nilai faktor daya pada fasa tertentu juga menunjukkan indikasi beban induktif dominan yang menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Temuan ini mengindikasikan perlunya penataan ulang beban serta penerapan strategi kompensasi daya reaktif yang adaptif guna menjaga keandalan dan efisiensi sistem distribusi listrik gedung secara menyeluruh.

Abstract. This study aims to examine electrical power quality in the XYZ Building by analysing key parameters such as voltage, current, active power, reactive power, and power factor. Measurements were conducted directly at the 33 kVA and 11 kVA Main Distribution Panels (MDPs) using a Power Quality Analyzer. The analysis method focused on evaluating load distribution across phases, power utilization efficiency, and identifying potential operational issues caused by load imbalance and excessive reactive power consumption. The results revealed significant voltage and current imbalances among phases, as well as uneven distribution of both active and reactive power, particularly on phase T. These imbalances contributed to high neutral current, increased power losses, and excessive loading on one part of the system. Additionally, the power factor on certain phases indicated the dominance of inductive loads, further reducing overall system efficiency. These findings highlight the need for load redistribution and the application of adaptive reactive power compensation strategies to ensure the reliability and efficiency of the building's electrical distribution system.

1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu sektor vital yang sangat berpengaruh dalam operasional kehidupan sehari-hari.

Pemanfaatan energi listrik menjadi yang paling mendominasi sektor industri dan rumah tangga. Energi listrik dipilih untuk menunjang aktivitas industri dan rumah tangga karena memiliki

keunggulan seperti ramah lingkungan, presisi dan keandalan yang tinggi, efisiensi dan produktivitas tinggi serta kemudahan dalam integrasi teknologi modern. Oleh karena itu, diperlukan kualitas daya listrik yang stabil serta handal untuk untuk menyuplai kebutuhan daya listrik.

Kualitas daya listrik (*power quality*) merupakan hal penting dalam sistem jaringan listrik. Permasalahan terkait kualitas daya listrik tidak hanya menjadi pembahasan pada jaringan transmisi dan distribusi, namun berpengaruh juga pada performa kualitas dan keandalan pada sisi akhir atau konsumen [1]. Seiring dengan perkembangan teknologi, terjadi peningkatan penggunaan perangkat kelistrikan yang canggih serta sensitif terhadap fluktuasi kelistrikan. Isu kualitas daya listrik semakin menjadi perhatian utama baik dari penyedia energi listrik (utilitas) maupun dari konsumen.

Karakteristik kualitas daya listrik secara umum mengacu pada tingkat kesesuaian parameter kelistrikan tegangan, arus, dan frekuensi listrik terhadap batas-batas yang dapat diterima serta tidak menimbulkan gangguan terhadap performa operasi peralatan listrik [2]. Kualitas daya listrik (*power quality*) merupakan faktor penting dalam menjamin penyediaan pasokan daya listrik yang handal, terutama pada instalasi kelistrikan di industri dan gedung-gedung komersial dan residensial. Mayoritas gedung-gedung di kawasan perkotaan seperti gedung layanan publik, komersial ataupun residensial umumnya telah menggunakan berbagai jenis beban non linier. Contohnya, pendingin ruangan (*air conditioner*), komputer, lift, eskalator, dan juga sistem pencahayaan hemat energi. Berbagai beban tersebut berkontribusi terhadap fluktuasi parameter kelistrikan serta menyumbang pembentukan harmonik dan perubahan faktor daya. Ketiga variabel tersebut apabila dibiarkan tanpa pengendalian yang baik maka akan berdampak pada penurunan efisiensi penggunaan energi listrik, kenaikan biaya operasional bahkan sampai menimbulkan dampak negatif pada umur peralatan [3]. Selain ketidakseimbangan beban antar fasa, gangguan listrik tiga fasa lainnya dapat berupa nilai arus netral yang tinggi. Akibatnya, terjadi percepatan degradasi pada penghantar dan transformator [4].

Pengukuran dan analisis kualitas daya listrik penting dilakukan sebagai upaya menjamin dan meningkatkan keandalan sistem yang beroperasi [5]. Proses tersebut dilaksanakan dengan alat berupa *power quality analyzer*. Data yang didapat melalui penggunaan *power quality analyzer* dapat dianalisis untuk memperoleh nilai kualitas daya listrik yang digunakan [6]. Kualitas daya listrik dikatakan baik apabila karakteristik parameter kelistrikan berada pada batas normal. Selain itu, indikator lain yakni ketika peralatan beroperasi secara normal tanpa gangguan.

Analisis data hasil pengukuran dapat dijadikan acuan dalam langkah pemeliharaan dan perbaikan yang dilakukan untuk menjaga keberlangsungan kualitas daya listrik [7]. Pengukuran dilakukan secara langsung pada panel LVMDP (*low voltage main distribution panel*) dan beberapa beban yang signifikan. Tujuannya, gambaran lengkap kualitas daya listrik dapat diperoleh secara menyeluruh [8]. Hasil berupa data akurat mengenai kualitas daya listrik yang kemudian dapat digunakan sebagai bahan analisis konsumsi daya listrik.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Kualitas daya listrik berperan sebagai parameter penting dalam sistem tenaga listrik yang menggambarkan tingkat kestabilan serta kehandalan pasokan listrik yang disediakan oleh utilitas dan diterima oleh konsumen. *International Electrotechnical Commission* (IEC) mendefinisikan kualitas daya listrik sebagai keseluruhan parameter kelistrikan yang menggambarkan kondisi suplai daya listrik dalam keadaan normal, utamanya yang berhubungan terhadap kontinuitas layanan serta karakteristik tegangan seperti besarnya tegangan, frekuensi, dan bentuk gelombang [9]. *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) juga mendefinisikan kualitas daya listrik sebagai konsep terkait penyediaan dan sistem pentanahan daya listrik bagi perangkat yang sensitif, untuk menjamin perangkat dapat beroperasi dengan baik sesuai kebutuhan [10].

Karakteristik kualitas daya listrik dapat ditinjau melalui beberapa parameter kelistrikan utama, diantaranya adalah:

2.1 Tegangan dan Frekuensi

Kualitas tegangan memiliki hubungan yang erat terhadap fluktuasi dan kestabilan nilai

tegangan nominal, tegangan yang baik harus memiliki kestabilan dengan nilai fluktuasi yang rendah [11]. Frekuensi juga perlu dijaga agar tetap konstan pada nilai standar yaitu 50 Hz atau 60 Hz tergantung negara yang menggunakan. Hal tersebut dikarenakan jika terjadi deviasi nilai frekuensi akan berdampak pada kerusakan alat hingga berpengaruh pada umur peralatan listrik.

2.2 Distorsi Harmonik

Harmonik merupakan gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik yang berasal dari distorsi gelombang arus dan tegangan [12]. Distorsi harmonik terjadi pada saat gelombang arus dan tegangan mengalami penyimpangan dari bentuk sinusoidal murni yang diakibatkan oleh beban-beban bersifat non linier seperti inverter, UPS, atau perangkat elektronik lainnya. Parameter yang biasa digunakan untuk melakukan pengukuran distorsi harmonik adalah menggunakan *total harmonic distortion* (THD) [13]. Dampak dari nilai THD yang berlebih dapat menyebabkan panas pada peralatan kelistrikan serta dapat menimbulkan kerugian daya [14].

2.3 Voltage Sag dan Swell

Voltage sag merupakan gangguan berupa penurunan nilai tegangan sesaat yang besarnya 90% dibawah nilai nominal sedangkan *voltage swell* merupakan kebalikan dari *voltage sag*. *Voltage swell* adalah kenaikan tegangan sesaat yang besarnya diatas 110% dari tegangan nominal. Kedua jenis gangguan tersebut dapat menyebabkan kerusakan pada sistem operasi tenaga listrik terutama pada peralatan yang memiliki sensitivitas terhadap fluktuasi tegangan [15].

2.4 Ketidakseimbangan Tegangan dan Arus

Ketidakseimbangan (*unbalance*) terjadi pada saat amplitudo atau sudut fasa dari sistem jaringan tiga fasa tidak sama. Hal ini terjadi salah satunya disebabkan oleh pembagian beban antar fasa tidak seimbang. Ketidakseimbangan yang tinggi dapat berpengaruh pada kinerja beban seperti motor menjadi tidak efisien, terjadinya peningkatan rugi-rugi daya, dan panas berlebih [16].

2.5 Gangguan Transien

Transien merupakan gangguan terhadap tegangan sesaat dengan amplitudo yang tinggi dan dalam durasi yang sangat singkat [17]. Umumnya, gangguan transien disebabkan oleh petir, *switching* beban yar, atau ketika terjadi

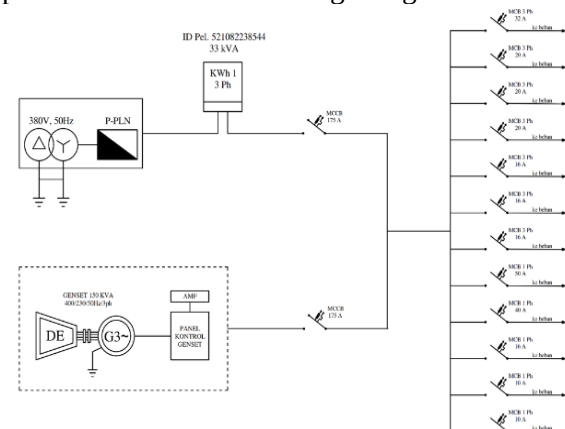
gangguan terhadap sistem jaringan. Gangguan tersebut dapat berdampak pada penurunan efisiensi sistem dan penurunan keandalan [18].

3. METODE PENELITIAN

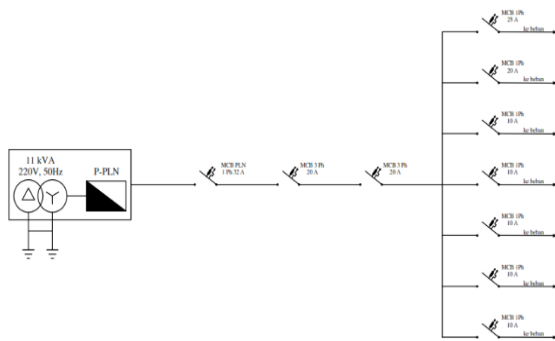
Analisis karakteristik kualitas daya listrik di Bangunan Gedung XYZ dilakukan melalui metode pengukuran langsung pada sistem distribusi tenaga listrik tiga fasa. Instrumen utama yang digunakan adalah *power quality analyzer* yang berfungsi untuk merekam data parameter kelistrikan secara *real-time*. Pengukuran difokuskan pada titik *incoming Main Distribution Panel* (MDP) utama, yaitu titik masuk dari suplai listrik ke seluruh sistem gedung yang terhubung langsung dengan dua buah transformator berkapasitas masing-masing 33 kVA dan 11 kVA. Pemusatan pengukuran pada titik ini dimaksudkan untuk memperoleh data yang representatif terhadap total beban yang terpasang di gedung [19].

Parameter yang dianalisis dalam penelitian ini terbatas pada tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya [20]. Pengambilan data dilakukan pada masing-masing fasa dan netral untuk memperoleh gambaran kondisi sistem secara menyeluruh.

Seluruh data yang diperoleh dianalisis secara kuantitatif dan dibandingkan dengan standar kelistrikan yang berlaku, seperti standar IEEE 519 dan SPLN D3.001-1. Hasil analisis ini digunakan untuk mengevaluasi tingkat kualitas daya listrik di Bangunan Gedung XYZ serta mengidentifikasi potensi gangguan atau ketidaksesuaian yang dapat berdampak pada performa sistem kelistrikan gedung.



Gambar 1. Single Line Diagram Panel MDP 33 kVA



Gambar 2. Single Line Diagram Panel MDP 11 kVA

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran tegangan fasa pada panel *Main Distribution Panel* (MDP) Bangunan Gedung XYZ menunjukkan adanya variasi nilai antara ketiga fasa, baik pada suplai dari trafo 33 kVA maupun 11 kVA. Ketidakseimbangan ini dianalisis lebih lanjut dengan menggunakan metode perhitungan *voltage unbalance percentage* yang mengacu pada standar NEMA MG-1, di mana batas maksimum yang direkomendasikan adalah 1%.

4.1 Tegangan Fasa

Nilai tegangan hasil pengukuran di Bangunan Gedung XYZ yang diukur pada panel MDP ditabulasikan secara sederhana (nilai minimum, nilai rata-rata dan nilai maksimum) seperti ditunjukkan Pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Nilai Tegangan fasa panel MDP 33 kVA Bangunan Gedung XYZ

Tegangan Fasa	VR-N (Volt)	VS-N (Volt)	VT-N (Volt)
Minimum	211.38	214.18	208.96
Rata-rata	216.44	220.10	214.21
Maksimum	223.60	227.54	219.57

Tabel 2. Nilai Tegangan fasa pada panel MDP 11 kVA Bangunan Gedung XYZ

Tegangan Fasa	VP-N (Volt)
Minimum	202.98
Rata-rata	219.47
Maksimum	228.12

Berdasarkan data pada Tabel 1, tegangan rata-rata fasa VR-N adalah 216,44 V, VS-N adalah 220,10 V, dan VT-N adalah 214,21 V. Berdasarkan ketiga nilai tersebut, terdapat

deviasi yang cukup nyata, terutama antara VS-N dan VT-N, yang menunjukkan indikasi *unbalance* antar fasa. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rata-rata ketidakseimbangan tegangan mencapai 1,47%, melebihi ambang batas yang dianjurkan.

Untuk menganalisis lebih dalam, ketidakseimbangan tegangan ini dikaji dari sisi pengaruhnya terhadap performa operasional beban, terutama beban induktif seperti motor listrik yang umum digunakan dalam sistem HVAC, lift, dan pompa gedung. Ketika motor tiga fasa menerima suplai tegangan yang tidak seimbang, arus fasa menjadi tidak seimbang pula, meskipun beban bersifat simetris [21]. Akibatnya, motor bekerja dengan arus lebih besar pada salah satu fasa, yang memicu kenaikan suhu lilitan, menyebabkan *overheating*, dan menurunkan efisiensi kerja motor.

Secara teknis, ketidakseimbangan tegangan sebesar 1,47% dapat menghasilkan peningkatan arus motor hingga 6-10% lebih tinggi dari kondisi normal, serta menurunkan torsi dan memperbesar rugi-rugi daya dalam sistem. Jika kondisi ini terjadi secara terus-menerus, maka umur pakai motor akan menurun secara signifikan dan risiko trip pada proteksi termal akan meningkat. Berdasarkan sistem distribusi gedung yang memiliki banyak peralatan elektronik dan motor, efek kumulatif dari *unbalance voltage* dapat mengarah pada peningkatan biaya operasional dan frekuensi pemeliharaan.

Sementara itu, hasil pengukuran pada panel MDP 11 kVA (Tabel 2) juga menunjukkan ketidakseimbangan tegangan, meskipun tidak sekompleks suplai dari trafo 33 kVA. Tegangan minimum tercatat sebesar 202,98 V dan maksimum sebesar 228,12 V. Kedua nilai tersebut memberikan rentang variasi tegangan yang cukup lebar. Hal ini menunjukkan perlunya pemeriksaan lebih lanjut pada sistem distribusi sekunder atau beban tidak seimbang yang terkoneksi pada panel ini.

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kondisi *unbalance voltage* di Bangunan Gedung XYZ sudah berada di luar ambang batas yang aman. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan penyeimbangan beban antar fasa, penyesuaian sistem panel distribusi, serta evaluasi konfigurasi beban besar agar distribusi arus

menjadi lebih merata. Selain itu, penggunaan perangkat pemantauan kualitas daya secara berkelanjutan juga direkomendasikan untuk deteksi dini terhadap ketidakseimbangan yang mungkin timbul akibat perubahan beban harian.

4.2 Arus Fasa

Pengukuran arus pada masing-masing fasa bertujuan untuk mengetahui distribusi beban di Bangunan Gedung XYZ. Ketidakseimbangan arus antar fasa menunjukkan adanya distribusi beban yang tidak merata, yang berpotensi menyebabkan arus netral tinggi dan peningkatan rugi-rugi daya. Hasil rekap ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Nilai arus fasa pada panel MDP 33 kVA Bangunan Gedung XYZ

Arus Fasa	Fasa R(A)	Fasa S(A)	Fasa T(A)	Arus N(A)
Minimum	21.72	21.87	38.13	18.30
Rata-rata	32.51	27.08	44.89	25.90
Maksimum	40.84	33.86	55.43	38.09

Tabel 4. Nilai arus fasa pada panel MDP 11 kVA

Arus Fasa	Arus Fasa (ampere)
Minimum	14.82
Rata-rata	31.18
Maksimum	57.87

Data pada Tabel 3 menunjukkan adanya disparitas nilai arus yang cukup besar antar fasa, terutama pada suplai dari trafo 33 kVA. Fasa T tercatat memiliki nilai arus rata-rata tertinggi sebesar 44,89 A, sedangkan fasa S memiliki arus rata-rata terendah, yaitu 27,08 A. Perbedaan antara kedua nilai ini mencapai 17,81 A, atau setara dengan selisih 28,89% pada saat beban puncak. Data tersebut menunjukkan ketidakseimbangan arus antar fasa yang cukup serius.

Selanjutnya, dilakukan analisis menggunakan metode estimasi beban dominan untuk mengidentifikasi kemungkinan penyebab distribusi arus yang timpang. Arus yang lebih besar pada salah satu fasa menunjukkan adanya konsentrasi beban satu fasa (misalnya *lighting*, AC, atau peralatan IT) yang dominan tersambung pada fasa tersebut.

Ketidakseimbangan ini menyebabkan arus tidak hanya mengalir di masing-masing konduktor fasa, tetapi juga menghasilkan arus netral yang cukup tinggi, yaitu dengan nilai rata-rata mencapai 25,90 A dan maksimum hingga 38,09 A.

Kondisi tersebut sangat berisiko terhadap performa sistem distribusi. Hal ini dikarenakan arus netral yang besar dapat menimbulkan peningkatan suhu konduktor dan titik sambungan panel. Jika tidak ditangani, efek termal jangka panjang ini dapat menyebabkan degradasi insulasi kabel, pemuatan sambungan terminal, hingga potensi kebakaran panel akibat panas berlebih. Selain itu, arus netral yang tinggi juga menjadi indikator adanya beban non-linear atau peralatan elektronik yang memicu distorsi harmonik sehingga pengaruhnya tidak hanya bersifat resistif tetapi juga menyebabkan fluktuasi tegangan dan rugi daya tambahan di sistem.

Arus maksimum pada panel MDP 11 kVA, tercatat mencapai 57,87 A yang menunjukkan bahwa beban yang tersambung sangat fluktuatif. Nilai arus rata-rata sebesar 31,18 A berpotensi terjadi lonjakan beban sesaat (transien) yang cukup signifikan. Apabila lonjakan tersebut terjadi secara berulang dapat menimbulkan gangguan pada proteksi panel maupun performa trafo 11 kVA yang menyuplai panel tersebut.

Berdasarkan hasil analisis data dapat disimpulkan bahwa distribusi beban di Bangunan Gedung XYZ masih belum optimal. Rekomendasi yang dapat dilakukan berupa penyusunan ulang koneksi beban pada panel, terutama beban satu fasa, agar dapat tersebar merata ke ketiga fasa. Pendekatan lain yang bisa dilakukan adalah melakukan audit energi secara berkala untuk mengidentifikasi beban dominan dan menyusun ulang pembagian fasa berdasarkan karakteristik konsumsi energi aktual di lapangan. Selain itu, pemasangan alat monitoring arus secara *real-time* juga dapat membantu manajemen gedung dalam menjaga keseimbangan sistem dan mencegah terjadinya *overloading* pada fasa tertentu.

4.3 Daya Nyata

Daya nyata merepresentasikan jumlah energi listrik yang secara langsung dimanfaatkan oleh beban untuk melakukan kerja. Ketidakseimbangan distribusi daya nyata

antar fasa dapat menjadi sinyal adanya ketidakteraturan dalam pembagian beban yang memerlukan penyesuaian sistem distribusi. Hasil pengukuran daya nyata pada tiap fasa di Panel MDP Bangunan Gedung XYZ dirangkum dalam bentuk tabel untuk mempermudah analisis. Tabel 7 dan Tabel 8 menyajikan data secara ringkas, meliputi nilai minimum, rata-rata, dan maksimum pada masing-masing fasa.

Tabel 5. Nilai Daya nyata pada panel MDP 33 kVA Bangunan Gedung XYZ

Daya Nyata	Fasa R (Watt)	Fasa S (Watt)	Fasa T (Watt)
Minimum	4325.46	4871.46	7753.91
Rata-rata	6630.86	5866.71	9154.44
Maksimum	8370.82	7197.27	11292.27

Tabel 6. Nilai Daya nyata pada panel MDP 11 kVA Bangunan Gedung XYZ

Daya Nyata	Fasa R (Watt)
Minimum	3304.36
Rata-rata	6640.13
Maksimum	11756.73

Daya nyata atau daya aktif merupakan indikator utama dalam menilai sejauh mana energi listrik dikonsumsi secara langsung oleh beban untuk melakukan kerja nyata di sistem. Pada pengukuran di panel *Main Distribution Panel* (MDP) Bangunan Gedung XYZ, data daya nyata yang terekam pada masing-masing fasa memberikan gambaran tidak hanya mengenai distribusi beban, tetapi juga efisiensi pemanfaatan kapasitas daya dari trafo 33 kVA dan 11 kVA.

Berdasarkan data Tabel 5, pada suplai dari trafo 33 kVA, daya nyata rata-rata pada fasa T tercatat paling tinggi sebesar 9.154,44 W, sedangkan fasa S hanya 5.866,71 W. Selisih ini mencapai 3.287,73 W atau sekitar 26,84% terhadap nilai maksimum. Kedua data tersebut mengindikasikan beban signifikan terkonsentrasi pada fasa tertentu. Pendekatan analisis yang digunakan kali ini adalah dengan melihat rasio pemanfaatan kapasitas daya trafo per fasa, yang dapat menggambarkan beban aktual terhadap kapasitas idealnya jika beban merata.

Melalui asumsi pembebanan ideal sebesar 11.000 W per fasa (untuk trafo 33 kVA tiga fasa dengan distribusi seimbang), nilai daya nyata rata-rata pada fasa S hanya memanfaatkan sekitar 53% dari kapasitas ideal, sedangkan fasa T hampir mencapai 83%. Hal ini menandakan bahwa meskipun secara total kapasitas trafo belum terlampaui, namun secara distribusi antar fasa terjadi ketidakseimbangan yang berpotensi menimbulkan penggunaan tidak optimal pada konduktor, proteksi, dan trafo itu sendiri.

Kondisi ini apabila dibiarkan dapat menyebabkan salah satu fasa bekerja lebih berat dibandingkan yang lain, meningkatkan suhu kerja pada jalur fasa tersebut, serta memperbesar kemungkinan trip pada MCB atau gangguan pada sistem proteksi selektif. Selain itu, pemanfaatan yang kurang merata ini juga dapat menurunkan *factor diversity* sistem, yang seharusnya dapat dimaksimalkan untuk menekan konsumsi energi dan biaya operasional.

Berdasarkan panel MDP 11 kVA (Tabel 6), meskipun hanya diukur pada satu fasa, fluktuasi daya nyata dari nilai minimum 3.304,36 W hingga maksimum 11.756,73 W menunjukkan adanya lonjakan beban yang signifikan. Hal tersebut mungkin berasal dari peralatan dengan siklus operasi *intermitten* atau beban non-linier. Nilai maksimum tersebut dalam konteks pemanfaatan daya, bahkan mendekati kapasitas penuh trafo (sekitar 12.650 W per fasa). Hal ini menunjukkan bahwa trafo mendekati batas *overload* pada kondisi beban puncak, khususnya jika beban terjadi serentak di fasa lainnya.

Melalui pendekatan ini, rekomendasi teknis yang dapat disampaikan adalah perlunya pemetaan ulang kelompok beban di sistem distribusi gedung, untuk memastikan bahwa daya nyata dapat didistribusikan lebih merata pada tiap fasa. Langkah tersebut tidak hanya penting untuk efisiensi operasional, tetapi juga untuk mencegah kondisi kerja tak seimbang yang berdampak buruk pada umur peralatan serta keamanan sistem. Evaluasi berkala terhadap daya nyata per fasa juga diperlukan sebagai bagian dari strategi manajemen beban dinamis. Khususnya dalam menghadapi variasi profil konsumsi harian atau musiman di lingkungan bangunan komersial.

4.4 Daya Reaktif

Pengukuran daya reaktif memberikan gambaran mengenai seberapa besar energi listrik yang digunakan untuk menghasilkan medan magnet, terutama pada peralatan bermuatan induktif seperti motor dan trafo. Berikut adalah data daya reaktif pada panel MDP 33 kVA dan panel MDP 11 kVA dijelaskan dalam Tabel 7 dan Tabel 8.

Tabel 7. Daya Reaktif pada panel MDP 33 kVA Bangunan Gedung XYZ

Daya Reaktif	Fasa R (VAR)	Fasa S (VAR)	Fasa T (VAR)
Minimum	2042.18	627.55	2403.82
Rata-rata	2248.09	877.97	2773.74
Maksimum	2652.00	1081.36	3205.09

Tabel 8. Daya reaktif pada panel MDP 11 kVA Bangunan Gedung XYZ

Daya Reaktif	Fasa (VAR)
Minimum	60.27
Rata-rata	452.67
Maksimum	677.18

Berdasarkan data Tabel 7, nilai rata-rata daya reaktif tertinggi pada panel MDP 33 kVA terjadi pada fasa T, yaitu sebesar 2.773,74 VAR. Jika dibandingkan dengan fasa S yang hanya mencatat rata-rata 877,97 VAR, terlihat adanya ketimpangan signifikan. Selisih konsumsi daya reaktif antar fasa ini menunjukkan ketidakseimbangan karakteristik beban induktif. Hal tersebut kemungkinan besar terjadi akibat konsentrasi peralatan bermuatan induktif seperti motor-motor besar atau AC komersial yang terpasang di fasa T.

Analisis yang digunakan adalah dengan menghitung tingkat konsumsi daya reaktif terhadap kapasitas nominal trafo, khususnya pada beban puncak. Kapasitas trafo 33 kVA dapat diasumsikan memiliki daya semu per fasa sebesar 11.000 VA. Jika fasa T mencatat daya reaktif maksimum 3.205,09 VAR, maka daya reaktif tersebut menyita hampir 29% dari kapasitas fasa tersebut. Data tersebut merupakan angka yang cukup tinggi dan berpotensi menurunkan margin kapasitas trafo untuk daya aktif (watt) sehingga trafo bekerja kurang efisien.

Selanjutnya, apabila ditinjau berdasarkan sisi kualitas daya, beban reaktif yang dominan dan tidak merata menyebabkan penurunan kualitas tegangan. Hal ini dapat mengakibatkan tegangan jatuh (*voltage drop*) dan bahkan gangguan harmonisa jika daya reaktif bersumber dari beban non-linier. Ketidakseimbangan daya reaktif tersebut juga mempersulit kompensasi dengan kapasitor bank konvensional yang biasanya dirancang berdasarkan nilai rata-rata keseluruhan.

Berdasarkan data pengukuran pada Panel MDP 11 kVA (Tabel 8), nilai daya reaktif tampak lebih kecil (maksimum hanya 677,18 VAR). Nilai ini setara dengan sekitar 6% dari kapasitas fasa (sekitar 11.000 VA), yang berarti kebutuhan kompensasi juga tetap diperlukan agar efisiensi tidak menurun. Berdasarkan kondisi tersebut, metode penanganan yang direkomendasikan adalah penggunaan kompensasi daya reaktif selektif per fasa. Kompensator berbasis *automatic power factor controller* (APFC) per panel atau smart capacitor bank dengan pengaturan berbasis beban dinamis yang dapat digunakan untuk menyeimbangkan daya reaktif secara real-time.

4.5 Faktor Daya

Faktor daya (power factor) merupakan indikator efisiensi pemanfaatan energi listrik dalam sistem, di mana semakin mendekati nilai 1, maka semakin optimal konversi energi listrik menjadi daya aktif. Hasil pengukuran faktor daya pada masing-masing fasa di Panel MDP Bangunan Gedung XYZ dijelaskan pada Tabel 9 dan Tabel 10.

Tabel 9. Nilai faktor daya pada panel MDP 33 kVA Bangunan Gedung XYZ

Faktor Daya (PF)	Fasa R	Fasa S	Fasa T
Minimum	0.89	0.98	0.93
Rata-rata	0.94	0.99	0.95
Maksimum	0.96	0.99	0.97

Tabel 10. Nilai faktor daya pada panel MDP 11 kVA Bangunan Gedung XYZ

Faktor Daya (PF)	Fasa R
Minimum	0.98
Rata-rata	0.99
Maksimum	1.00

Berdasarkan data Tabel 9, rata-rata faktor daya pada Panel MDP 33 kVA berada di kisaran 0,94 – 0,99, dengan nilai minimum pada fasa R sebesar 0,89. Meski secara umum masih memenuhi ambang batas minimal dari standar PLN ($\geq 0,85$), namun terlihat bahwa fasa R konsisten memiliki power factor yang lebih rendah dibanding fasa lain, mengindikasikan adanya dominasi beban induktif atau fluktuasi konsumsi daya reaktif pada fasa tersebut. Ketidakseimbangan ini mengarah pada operasi sistem yang kurang optimal secara internal, meskipun masih dalam rentang kelayakan eksternal. Ditinjau pada sisi evaluasi performa operasional, perbedaan faktor daya antar fasa menunjukkan bahwa strategi kompensasi daya reaktif belum dilakukan secara merata atau adaptif.

Jika diasumsikan sistem dapat meningkatkan power factor dari rata-rata 0,94 menjadi mendekati 1, maka terdapat potensi pengurangan arus yang mengalir dalam sistem sebesar 6–8% (berdasarkan perhitungan $I = P / (\sqrt{3} \times V \times PF)$). Reduksi arus ini akan berdampak langsung pada penurunan kerugian energi akibat panas (I^2R losses), serta memperbesar margin kapasitas operasi transformator dan kabel distribusi, yang pada akhirnya memperpanjang usia pakai komponen dan menurunkan biaya pemeliharaan.

Pada panel MDP 11 kVA (Tabel 10), performa sistem terlihat jauh lebih baik dengan rata-rata power factor mencapai 0,99 dan nilai maksimum 1,00. Secara praktis, upaya peningkatan faktor daya dapat difokuskan pada fasa R di panel MDP 33 kVA. Penggunaan *automatic capacitor bank controller* atau sistem manajemen daya berbasis IoT dapat menjadi solusi untuk pemantauan dan pengendalian *real-time*.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi karakteristik kualitas daya listrik di Bangunan Gedung XYZ, diperoleh bahwa kondisi sistem distribusi tenaga listrik mengalami ketidakseimbangan tegangan dan arus antar fasa yang melebihi standar NEMA, yang berdampak pada peningkatan rugi-rugi daya, suhu penghantar, serta potensi kerusakan peralatan listrik. Selain itu, distribusi daya aktif dan reaktif tidak merata, dengan dominasi konsumsi pada fasa

tertentu, yang menyebabkan penggunaan kapasitas trafo dan instalasi tidak optimal.

Daya reaktif yang tinggi pada beberapa fasa menunjukkan banyaknya beban induktif tanpa kompensasi yang memadai, yang turut menurunkan efisiensi sistem. Faktor daya pada panel utama juga ditemukan masih di bawah standar optimal, terutama pada fasa-fasa dengan beban dominan induktif. Walaupun nilai distorsi harmonik masih dalam batas toleransi IEEE 519-1992, tetap diperlukan monitoring berkala untuk mencegah degradasi kualitas daya ke depan. Hasil ini menegaskan pentingnya penataan ulang pembagian beban, penerapan kompensasi daya reaktif berbasis fasa, serta penggunaan alat monitoring *real-time* guna menjaga efisiensi, keandalan, dan umur panjang instalasi listrik di gedung tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. B. Mohammed, M. A. Mohd Ariff, and S. Najwa Ramli, "Power quality improvement using dynamic voltage restorer in electrical distribution system: an overview," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 17, no. 1, p. 86, Jan. 2020, doi: 10.11591/ijeecs.v17.i1.pp86-93.
- [2] A. ayor akuak Mayen, I. N. Syamsiana, and A. D. Nofvowan, "Power Quality Analysis of Electrical Installation at Commercial Center," *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 11, no. 3, pp. 162–167, Oct. 2024, doi: 10.33795/elposys.v11i3.5587.
- [3] A. A. Alkahtani *et al.*, "Power Quality in Microgrids Including Supraharmonics: Issues, Standards, and Mitigations," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 127104–127122, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3008042.
- [4] C. Radityatama, J. Windarta, and E. Handoyo, "ANALISA INDEKS KONSUMSI ENERGI DAN KUALITAS DAYA LISTRIK DI KAMPUS UNDIP," *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 168–175, Mar. 2021, doi: 10.14710/transient.v10i1.168-175.
- [5] A. S. J. Wardhana and E. S. Damarwan, "Identification of energy saving potential

- through energy audit at PT. ABC,” *Jurnal edukasi Elektro*, vol. 7, no. 1, pp. 63–74, 2023.
- [6] Ahmad Hermawan, Zahra Mulia Sari, and Sapto Wibowo, “Analisis Power Quality Sistem Kelistrikan Pada Apartemen Malang City Point,” *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 7, no. 3, pp. 69–74, Feb. 2023, doi: 10.33795/elposys.v7i3.671.
- [7] A. S. J. Wardhana and I. Wijayanto, “STUDI POWER QUALITY DI BALAI LATIHAN PENDIDIKAN TEKNIK (BLPT) YOGYAKA,” *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 3, no. 2, 2019.
- [8] A. Hermawan, M. Mudjiono, C. Wiharya, and S. Seftiana, “Analisis Keseimbangan Beban dan Harmonisa Di Gedung Graha Polinema Politeknik Negeri Malang,” *ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 8, no. 3, pp. 47–52, Nov. 2021, doi: 10.33795/elposys.v8i3.76.
- [9] International Electrotechnical Commission, *IEC 61000-4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*. Geneva: IEC, 2015.
- [10] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std 1159-2019: IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. New York: IEEE, 2019.
- [11] A. Zulkarnaini, R. Sinambela, L. Lisapaly, and M. Manik, “ANALISIS PENGUKURAN HARMONISA TEGANGAN DAN ARUS LISTRIK DI GEDUNG ADMINISTRASI UNIVERSITAS JAYABAYA,” *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 26, no. 3, pp. 132–138, Jul. 2024, doi: 10.14710/transmisi.26.3.132-138.
- [12] G. Samiaji, A. Multi, O. A. Rozak, and L. Faturrachman, “ANALISIS PERBANDINGAN KUALITAS DAYA LISTRIK BERDASARKAN HARMONISA PADA MOTOR LISTRIK DENGAN SUPlai TENAGA SURYA DAN PLN,” *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 3, Aug. 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3.4876.
- [13] Ł. Michalec, M. Jasiński, T. Sikorski, Z. Leonowicz, Ł. Jasiński, and V. Suresh, “Impact of Harmonic Currents of Nonlinear Loads on Power Quality of a Low Voltage Network–Review and Case Study,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 12, p. 3665, Jun. 2021, doi: 10.3390/en14123665.
- [14] A. Arranz-Gimon, A. Zorita-Lamadrid, D. Morinigo-Sotelo, and O. Duque-Perez, “A Review of Total Harmonic Distortion Factors for the Measurement of Harmonic and Interharmonic Pollution in Modern Power Systems,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 20, p. 6467, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14206467.
- [15] C. Kumar, P. Ghosh, and S. Chatterjee, “Enhancement of Power Quality by mitigating of sag and swell problem in power system using DVR,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 1, pp. 131–137, 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.04.022.
- [16] I. A. Ibrahim and M. J. Hossain, “Low Voltage Distribution Networks Modeling and Unbalanced (Optimal) Power Flow: A Comprehensive Review,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 143026–143084, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3120803.
- [17] N. Abas, S. Dilshad, A. Khalid, M. S. Saleem, and N. Khan, “Power Quality Improvement Using Dynamic Voltage Restorer,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 164325–164339, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3022477.
- [18] F. C. Baiceanu, F. Munteanu, and C. Nemes, “Transient Power Quality Mitigation by Synchronized Capacitor Banks Switching,” in *2020 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)*, IEEE, Oct. 2020, pp. 087–092. doi: 10.1109/EPE50722.2020.9305559.
- [19] S. D. Cahyo, S. Nisworo, D. Pravitasari, T. Elekto, and U. Tidar, “AUDIT KUALITAS DAYA LISTRIK RUMAH SAKIT JIWA Prof. Dr SOEROJO MAGELANG,” *THETA OMEGA: Journal of Electrical Engineering*, p. 2021.
- [20] T. K. Gimenes, M. P. C. da Silva, J. J. G. Ledesma, and O. H. Ando, “Impact of distributed energy resources on power quality: Brazilian scenario analysis,” *Electric Power Systems Research*, vol. 211, p. 108249, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108249.
- [21] T. H. T. Maryadi, A. S. J. Wardhana, E. S. Damarwan, and T. Sukisno, “Performance of frequency regulation on power in the development of variable speed drive training kit as a learning media for motor control practices,” *J Phys Conf Ser*, 2021.