



JASEE

Journal of Application and Science on Electrical Engineering

<https://jurnal.widyagama.ac.id/index.php/jasee/index>



Analisis Deviasi Pengukuran Energi Listrik antara kWh Meter PLN dan Power Meter Digital pada Site BTS Telekomunikasi

Eko Wahyu Santoso¹, Arief Budi Laksono¹, M. Remy Bima Susilo¹

¹Program Studi Teknik Elektro, Universitas Islam Lamongan, Indonesia

Corresponding author, email: ekowahyu.santoso@unisla.ac.id

Abstract

A base transceiver station site operates continuously, so electricity cost is a major operational expenditure. Two energy meters normally work in parallel at such a site: the utility kilowatt-hour meter used as the legal basis for billing and an internal digital power meter connected to the power management system for operational monitoring. A discrepancy between the two readings can reduce the reliability of bill verification. This study analyses the measurement deviation between both instruments at a base transceiver station site in Lamongan Regency and evaluates the voltage profile, current profile, and three-phase load unbalance at the same site. A comparative quantitative method was applied by recording both meters at four observation points within ten days. During the ten-day period, the utility meter registered 2216.08 kilowatt-hours, while the digital power meter registered 2205.35 kilowatt-hours, giving a deviation of 10.73 kilowatt-hours or 0.48 percent. This value is lower than the ± 1 percent class 1 benchmark used for comparison in this study. The voltage unbalance stayed below two percent, whereas the current unbalance reached 29 to 46 percent; therefore, redistribution of the single-phase loads is recommended.

Keywords: base transceiver station, digital power meter, kilowatt-hour meter, three-phase load unbalance, measurement deviation.



p-ISSN : 2721-3625

e-ISSN : 2721-320X

1. PENDAHULUAN

Base Transceiver Station (BTS) merupakan simpul utama jaringan telekomunikasi seluler yang beroperasi terus-menerus selama 24 jam untuk menjamin ketersediaan layanan komunikasi. Konsekuensi pola operasi tersebut adalah konsumsi energi listrik yang besar dan berkesinambungan, sehingga biaya energi menjadi salah satu komponen biaya operasional terbesar bagi penyedia infrastruktur telekomunikasi, terutama pada site yang ditopang pasokan jaringan tegangan rendah dengan cadangan generator set. Efisiensi pengelolaan energi pada level site dengan demikian tidak hanya menjadi persoalan teknis, tetapi juga persoalan pengendalian biaya.

Pada umumnya sebuah site BTS dilengkapi dua jenis alat ukur energi yang bekerja paralel namun dimiliki pihak yang berbeda. Alat ukur pertama adalah kWh meter milik PT PLN (Persero) yang

<https://doi.org/10.31328/jasee.v7i1.03>

Received: 17/03/2026

Revised: 08/03/2026

Accepted: 31/03/2026, published by ©UWG Press 2026

terpasang pada titik sambung pelanggan dan berfungsi sebagai alat transaksi resmi dasar penagihan rekening listrik. Alat ukur kedua adalah power meter digital internal pada panel distribusi site yang terhubung dengan Power Management System (PMS) dan berfungsi memantau konsumsi energi, tegangan, arus tiap fasa, serta status perangkat catu daya. Data power meter dikirimkan ke pusat pemantauan melalui Network Management System (NMS) sehingga kondisi kelistrikan site dapat diawasi dari jarak jauh secara waktu nyata.

Keberadaan dua alat ukur pada objek yang sama seharusnya menghasilkan pembacaan yang identik atau sangat berdekatan. Pada praktiknya, hasil pembacaan kedua alat ukur kerap berbeda. Deviasi tersebut dapat bersumber dari perbedaan kelas akurasi kedua alat ukur, kesalahan rasio maupun polaritas transformator arus yang melayani power meter digital, perbedaan titik pengukuran pada instalasi, keberadaan beban yang tidak melewati kanal pengukuran power meter, hingga penurunan kinerja alat ukur akibat usia pemakaian. Apabila deviasi tidak teridentifikasi, pengelola site kehilangan dasar objektif untuk memverifikasi tagihan listrik sehingga berpotensi menimbulkan kerugian finansial maupun perselisihan pencatatan energi.

Kajian mengenai verifikasi silang alat ukur energi telah banyak dilakukan pada konteks yang berbeda-beda. Penelitian [1] membandingkan kWh meter pascabayar dan prabayar pada titik ukur yang sama dan memperoleh selisih pembacaan yang masih berada dalam toleransi kelas meter, sehingga kedua teknologi dinilai setara sebagai alat transaksi. Studi [2] merancang sistem pemantauan konsumsi energi berbasis Internet of Things dan memperoleh akurasi pengukuran energi sekitar 97,9% hingga 99% terhadap alat ukur pembanding. Penelitian [3] membangun alat pemantau biaya pemakaian energi berbasis sensor PZEM-004T dengan hasil pembacaan yang mendekati alat ukur acuan, sedangkan Studi [4] mengembangkan pemantauan besaran listrik instalasi melalui aplikasi bergerak. Kajian mutakhir memperkuat arti penting verifikasi silang semacam ini. Studi [5] membandingkan lima sistem pengukuran energi pada satu instalasi yang sama dan menemukan bahwa setiap modul menunjukkan deviasi kecil terhadap yang lain, sehingga besar deviasi tersebut justru menjadi penentu kelas akurasi perangkat. Kajian [6] meninjau perkembangan perangkat pengukuran daya dan energi beserta perbandingan unjuk kerjanya, sedangkan Penelitian [7] memanfaatkan sistem smart metering untuk mendeteksi anomali kualitas daya. Penelitian [8] menunjukkan bahwa kesalahan pengawatan primer pada meter transaksi merupakan sumber penyimpangan pembacaan yang nyata di lapangan, sementara Kajian [9] merangkum pemanfaatan analitik data meter untuk menjamin keandalan sistem. Pada arah kajian yang berbeda, Penelitian [10] mengevaluasi ketidakseimbangan beban pada gardu trafo tiang 20 kV dan menunjukkan bahwa penyeimbangan beban mampu menurunkan ketidakseimbangan dari 64,1% menjadi sekitar 1,2% sekaligus menekan arus netral dari 25,05 A menjadi 1,8 A.

Penelitian-penelitian tersebut umumnya membandingkan dua meter transaksi atau menguji perangkat rancang bangun terhadap alat ukur acuan pada instalasi rumah tangga, dan analisis ketidakseimbangan beban dilakukan pada level gardu distribusi. Perbandingan antara meter transaksi penyedia tenaga listrik dengan power meter digital industri yang telah terpasang dan terintegrasi pada PMS serta NMS sebuah site telekomunikasi masih jarang dilaporkan, demikian pula pemanfaatan rangkaian data pengukuran yang sama untuk mengevaluasi ketidakseimbangan beban pada level instalasi pelanggan. Celah inilah yang menjadi kebaruan penelitian ini.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan menghitung deviasi hasil pengukuran energi listrik antara kWh meter PLN dan power meter digital pada sebuah site BTS di Kabupaten Lamongan, mengevaluasi deviasi tersebut menggunakan benchmark kelas akurasi meter statis,

menganalisis profil tegangan, arus, serta ketidakseimbangan beban tiga fasa site, dan mengidentifikasi faktor-faktor potensial yang dapat memengaruhi deviasi. Hasil penelitian diharapkan menjadi dasar verifikasi internal tagihan listrik dan bahan evaluasi kondisi instalasi pengukuran bagi pengelola site telekomunikasi.

2. STUDI PUSTAKA

2.1 Pengukuran Energi Listrik dan Kelas Akurasi Meter

Energi listrik merupakan hasil integrasi daya aktif terhadap waktu dan dinyatakan dalam satuan kilowatt jam. Meter energi menampilkan hasil integrasi tersebut sebagai register kumulatif, sehingga konsumsi energi pada suatu interval pengamatan diperoleh sebagai selisih pembacaan register pada dua titik waktu sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (1) [11].

$$\Delta W = W_2 - W_1 \quad (1)$$

dengan ΔW adalah konsumsi energi pada interval pengamatan (kWh), W_1 pembacaan register pada awal interval, dan W_2 pembacaan register pada akhir interval. Perhitungan dilakukan terpisah untuk masing-masing alat ukur pada interval yang sama.

Setiap meter energi memiliki batas kesalahan yang dinyatakan melalui kelas akurasi. Standar IEC 62053-21 menetapkan batas kesalahan meter statis energi aktif sebesar $\pm 1\%$ untuk kelas 1 dan $\pm 2\%$ untuk kelas 2 pada kondisi acuan [12], sedangkan IEC 62053-11 mengatur ketentuan serupa untuk meter elektromekanis [13]. Jika dua meter kelas 1 mengukur energi yang sama dan masing-masing berada pada batas kesalahan dengan arah berlawanan, selisih antarmeter secara teoritis dapat mendekati 2%. Rangkaian instrumentasi juga dapat menyumbang kesalahan, khususnya transformator arus yang kelas akurasi dan pengaruh bebannya diatur dalam IEC 61869-2 [14]. Deviasi pengukuran antar alat ukur dihitung dengan meter transaksi sebagai acuan sebagaimana Persamaan (2).

$$\delta = \frac{\Delta W_{PLN} - \Delta W_{PMS}}{\Delta W_{PLN}} \times 100\% \quad (2)$$

dengan δ adalah deviasi pengukuran (%), ΔW_{PLN} konsumsi energi menurut kWh meter PLN, dan ΔW_{PMS} konsumsi energi menurut power meter digital pada interval yang sama. Nilai deviasi positif berarti pembacaan power meter digital lebih rendah daripada kWh meter PLN.

2.2 Ketidakseimbangan Beban Tiga Fasa

Beban satu fasa pada instalasi pelanggan seperti pendingin ruangan, penerangan, dan soket layanan jarang terdistribusi merata sehingga menimbulkan ketidakseimbangan arus antarfasa. Ketidakseimbangan yang besar mengalirkan arus pada penghantar netral, memperbesar rugi-rugi penghantar yang sebanding dengan kuadrat arus, dan membuat kapasitas suplai tiga fasa tidak termanfaatkan secara optimal karena satu fasa bekerja jauh lebih berat daripada fasa lain [15], [16]. Tingkat ketidakseimbangan dihitung dengan pendekatan deviasi maksimum terhadap nilai rata-rata sebagaimana Persamaan (3).

$$\Delta X = \frac{|X_m - X_{avg}|}{X_{avg}} \times 100\% \quad (3)$$

dengan ΔX adalah ketidakseimbangan tegangan atau arus (%), X_m nilai fasa yang paling jauh dari rata-rata, dan X_{avg} nilai rata-rata ketiga fasa pada titik waktu yang sama. Praktik pengelolaan

jaringan distribusi umumnya menjadikan ketidakseimbangan arus 20% sebagai ambang indikatif perlunya penataan ulang beban, sedangkan ketidakseimbangan tegangan pada instalasi pelanggan lazim dibatasi 2% [17], [18].

Selain kesetimbangan beban, mutu tegangan pelayanan menjadi indikator penting kualitas daya. Tegangan standar jaringan tegangan rendah di Indonesia ditetapkan 230/400 V [19] dengan variasi pelayanan yang lazim dipersyaratkan pada rentang +5% hingga -10%, sedangkan indikator mutu pelayanan dan mekanisme kompensasinya diatur dalam ketentuan tingkat mutu pelayanan tenaga listrik [20].

Daya rata-rata site pada suatu interval digunakan sebagai uji kewajaran data energi terhadap estimasi beban terpasang, dihitung dengan Persamaan (4).

$$P_{avg} = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (4)$$

dengan P_{avg} adalah daya rata-rata (kW) dan Δt panjang interval pengamatan dalam jam.

2.3 Sistem Catu Daya dan Pemantauan Site BTS

Sistem kelistrikan site BTS tersusun berlapis. Suplai utama berasal dari jaringan tegangan rendah tiga fasa dan disalurkan melalui panel Automatic Transfer Switch yang memindahkan suplai ke genset cadangan ketika jaringan padam. Sebagian besar perangkat telekomunikasi bekerja pada tegangan searah -48 V, sehingga daya bolak-balik dikonversi oleh kabinet rectifier yang sekaligus mengisi baterai cadangan. Beban bolak-balik yang tersisa didominasi pendingin ruangan dan penerangan shelter. Konfigurasi berlapis ini menjadikan konsumsi energi site relatif stabil sepanjang hari, yang justru menguntungkan bagi perbandingan dua alat ukur karena syarat kestabilan beban terpenuhi [21], [22].

3. METODE

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan komparatif dan deskriptif [23]. Pendekatan komparatif digunakan untuk membandingkan hasil pengukuran energi antara dua alat ukur yang terpasang pada jalur suplai yang sama, sedangkan pendekatan deskriptif digunakan untuk menggambarkan profil tegangan, arus, dan ketidakseimbangan beban tiga fasa site selama periode pengamatan.

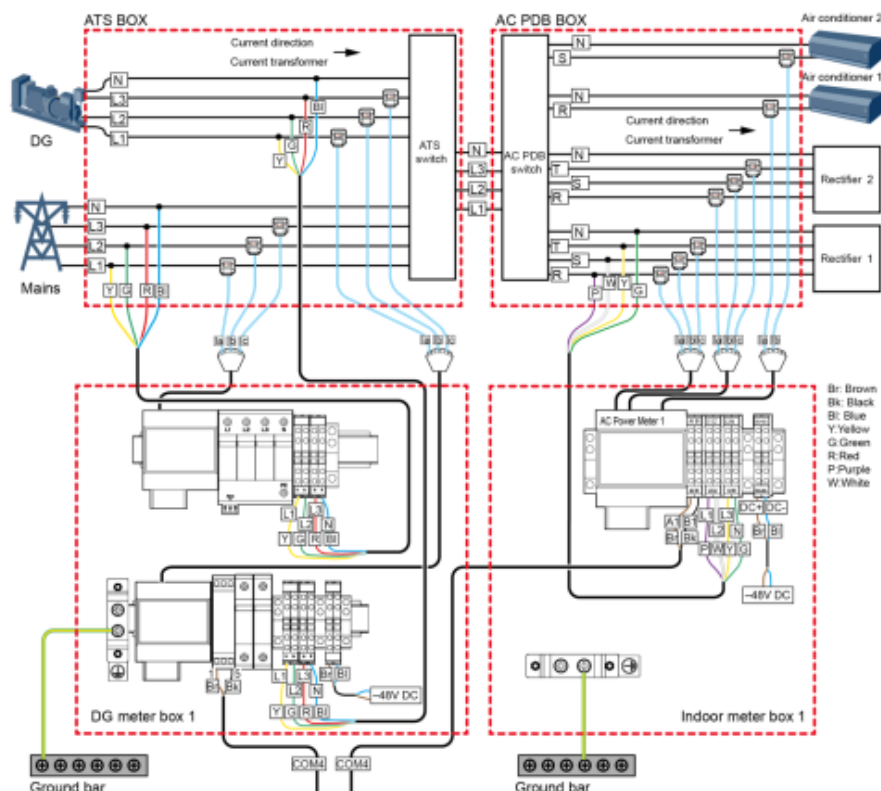
3.1 Objek dan Lokasi Penelitian

Objek penelitian adalah sistem pengukuran energi listrik pada jalur suplai AC mains sebuah site BTS berkode 20LMG027 di Kecamatan Lamongan, Kabupaten Lamongan, Provinsi Jawa Timur. Identitas perusahaan pemilik dan pengelola site disamarkan sesuai ketentuan kerahasiaan data. Site dicatu jaringan tegangan rendah tiga fasa dengan kWh meter digital sebagai meter transaksi dan dilengkapi tiga unit power meter digital yang terhubung PMS serta NMS, dengan kanal 1 mengukur suplai AC mains. Profil teknis site dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Profil site objek penelitian

Atribut	Keterangan
Kode site	20LMG027
Lokasi	Kecamatan Lamongan, Kabupaten Lamongan, Jawa Timur
Jenis site	Greenfield dengan shelter perangkat
Sumber daya utama	Jaringan tegangan rendah tiga fasa 230/400 V
Daya tersambung	23.000 VA, tiga fasa
Meter transaksi	kWh meter digital tiga fasa
Sumber cadangan	1 unit genset dengan panel ATS
Sistem DC	1 kabinet rectifier (3 modul $\times$ 50 A), busbar -48 VDC
Baterai	2 kelompok baterai 48 V, total 340 Ah
Pemantauan	3 power meter digital + PMS terhubung NMS
Beban utama	Perangkat telekomunikasi (DC), pendingin ruangan, penerangan

Posisi kedua alat ukur pada instalasi site diperlihatkan pada Gambar 1. kWh meter PLN terpasang pada titik sambung pelanggan, sedangkan transformator arus kanal 1 power meter digital terpasang pada panel distribusi site di sisi hilir titik sambung. Perbedaan posisi kedua titik ukur merupakan salah satu faktor potensial yang dapat berkontribusi terhadap deviasi dan diperiksa dalam pembahasan penelitian ini.



Gambar 1. Diagram satu garis sistem pengukuran site objek penelitian

3.2 Prosedur Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan pada empat titik waktu dalam rentang sepuluh hari, yaitu pencatatan awal (Time-1), satu jam setelah pencatatan awal (Time-2), lima hari setelahnya (Time-3),

dan sepuluh hari setelahnya (Time-4). Interval satu jam digunakan untuk memeriksa konsistensi jangka pendek kedua meter, sedangkan interval lima dan sepuluh hari memberikan perbandingan konsumsi energi yang lebih representatif terhadap operasi normal site sekaligus mencakup hari kerja dan akhir pekan.

Tanggal dan jam pelaksanaan masing-masing titik waktu dicatat pada formulir pencatatan lapangan dan diverifikasi silang terhadap penanda waktu pada tangkapan layar NMS, sebagaimana dirangkum pada Tabel 2. Seluruh pencatatan dilakukan pada rentang siang hari, yaitu antara pukul 12.37 dan 13.37, agar kondisi kerja beban pendingin ruangan pada tiap titik waktu sebanding.

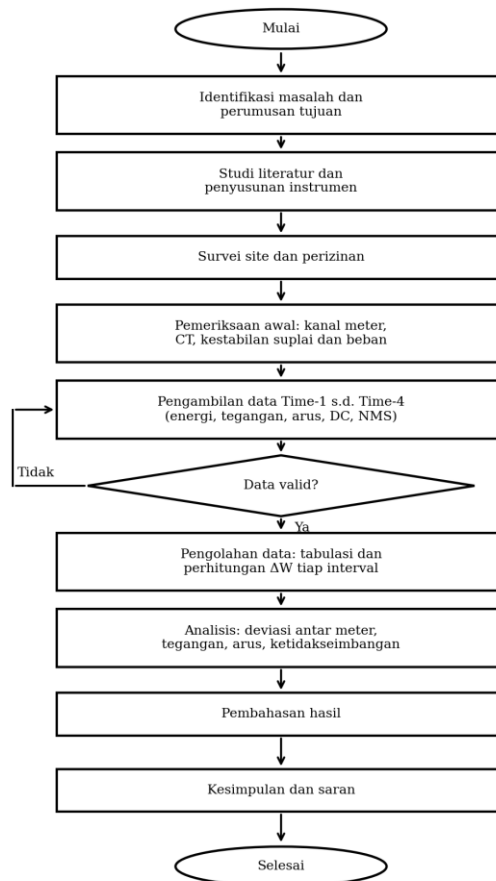
Tabel 2. Jadwal pelaksanaan pencatatan data

Titik waktu	Tanggal	Pukul (WIB)	Selang terhadap Time-1	Durasi (jam)
Time-1	10 Juli	12.37	—	—
Time-2	10 Juli	13.37	60 menit	1,00
Time-3	15 Juli	13.30	5 hari 53 menit	120,88
Time-4	20 Juli	12.45	10 hari 8 menit	240,13

Karena selang antar titik waktu tidak tepat kelipatan 24 jam, seluruh perhitungan daya rata-rata pada penelitian ini menggunakan durasi sebenarnya pada kolom terakhir Tabel 2, bukan durasi bulat.

Sebelum pencatatan, tiga pemeriksaan awal dilakukan untuk menjamin validitas data, yaitu memastikan kesesuaian nomor kanal power meter dengan konfigurasi pada NMS dan penandaan kabel di lapangan, memastikan jenis serta arah pemasangan transformator arus sesuai label, dan memastikan suplai jaringan dalam kondisi normal dengan beban DC site stabil. Pada setiap titik waktu dicatat register energi kumulatif kedua meter, tegangan dan arus tiap fasa pada kedua meter, tegangan busbar serta arus beban total sistem DC, dan tangkapan layar NMS. Seluruh pembacaan didokumentasikan dengan foto berstempel waktu, kemudian divalidasi silang terhadap data NMS pada waktu yang sama. Tahapan penelitian secara keseluruhan digambarkan pada Gambar 2.

Rantai pengukuran power meter digital terhubung ke pengendali site melalui antarmuka RS-485 dengan protokol Modbus pada laju 9600 bit/s, dan datanya diteruskan ke pusat pemantauan sehingga besaran listrik site dapat dibaca secara waktu nyata. Kanal 1 pada meter tersebut dialamatkan khusus untuk jalur AC mains, terpisah dari kanal yang melayani panel distribusi lain. Sistem searah site menggunakan tiga modul rectifier pada busbar -48 VDC dengan dua kelompok baterai berkapasitas total 340 Ah, sedangkan kWh meter PLN merupakan meter digital tiga fasa yang telah terpasang sejak tahun 2008. Perlu dicatat sebagai keterbatasan penelitian bahwa kelas akurasi kedua meter serta rasio dan kelas akurasi transformator arus tidak terdokumentasi pada berkas administrasi site. Oleh karena itu, batas kelas 1 dan kelas 2 pada IEC 62053-21 [12] digunakan hanya sebagai benchmark evaluatif, bukan sebagai verifikasi kelas akurasi aktual kedua meter.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

3.3 Teknik Analisis Data

Konsumsi energi tiap interval dihitung dengan Persamaan (1) secara terpisah untuk kedua alat ukur, kemudian deviasi antar alat ukur dihitung dengan Persamaan (2) dan dibandingkan dengan benchmark toleransi kelas 1 ($\pm 1\%$) dan kelas 2 ($\pm 2\%$) menurut IEC 62053-21. Karena kelas aktual kedua meter tidak terdokumentasi, perbandingan tersebut digunakan sebagai evaluasi kewajaran deviasi, bukan sebagai pengujian sertifikasi kelas meter. Ketidakseimbangan tegangan dan arus dihitung dengan Persamaan (3) pada tiap titik waktu, sedangkan daya rata-rata site dihitung dengan Persamaan (4) sebagai uji kewajaran data energi terhadap estimasi beban terpasang. Seluruh perhitungan dilakukan menggunakan perangkat lunak lembar kerja dan hasilnya disajikan dalam bentuk tabel serta grafik.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengukuran

Pembacaan kWh meter PLN pada keempat titik waktu pengamatan disajikan pada Tabel 3, sedangkan pembacaan power meter digital kanal 1 pada titik waktu yang sama disajikan pada Tabel 4. Penamaan fasa A, B, dan C pada power meter digital berkorespondensi dengan fasa R, S, dan T pada kWh meter PLN.

Tabel 3. Data pembacaan kWh meter PLN

Besaran	Time-1	Time-2	Time-3	Time-4
Energi kumulatif (kWh)	403.410,67	403.421,82	404.525,29	405.626,75
Tegangan fasa R (V)	223,2	225,9	227,2	222,2
Tegangan fasa S (V)	231,0	228,9	233,4	226,4
Tegangan fasa T (V)	226,3	227,8	232,1	228,7
Arus fasa R (A)	17,40	17,23	16,53	12,40
Arus fasa S (A)	12,70	13,10	12,40	12,50
Arus fasa T (A)	23,20	22,90	22,70	23,70

Tabel 4. Data pembacaan power meter digital kanal 1

Besaran	Time-1	Time-2	Time-3	Time-4
Energi kumulatif (kWh)	66.781,65	66.792,14	67.890,56	68.987,00
Tegangan fasa A (V)	223,4	226,2	227,5	222,5
Tegangan fasa B (V)	231,1	233,0	233,2	226,8
Tegangan fasa C (V)	226,0	228,9	232,9	228,5
Arus fasa A (A)	17,90	17,25	16,66	12,34
Arus fasa B (A)	12,62	12,30	12,04	12,33
Arus fasa C (A)	23,16	22,90	22,62	23,44

Data pendukung dari sistem catu daya searah pada tiap titik waktu disajikan pada Tabel 5. Tegangan busbar searah bergerak hanya dalam rentang 0,2 V dan arus beban total hanya dalam rentang 0,6 A selama sepuluh hari, sehingga daya beban searah praktis tetap. Baterai berada dalam status pengisian float dengan kapasitas tersisa 98% dan arus baterai 2,8 A pada pencatatan awal, yang berarti baterai sedang menerima pengisian dan bukan memikul beban. Status tersebut menegaskan bahwa selama pengamatan tidak terjadi pemadaman yang membuat baterai mengambil alih beban atau genset beroperasi, sehingga seluruh energi yang tercatat kedua meter memang berasal dari suplai jaringan. Kondisi ini merupakan prasyarat kesahihan perbandingan kedua alat ukur.

Tabel 5. Data sistem catu daya searah pada tiap titik waktu

Besaran	Time-1	Time-2	Time-3	Time-4
Tegangan busbar (VDC)	52,6	52,6	52,8	52,6
Arus beban total (A)	74,3	74,2	74,0	74,6
Daya beban searah (kW)	3,91	3,90	3,91	3,92

Daya beban searah pada Tabel 5 berkisar 3,90 hingga 3,92 kW, yaitu hanya 0,5% variasi selama sepuluh hari. Kestabilan ini penting karena beban searah merupakan komponen beban site yang paling dominan sekaligus paling kontinu, sehingga variasi konsumsi energi total site sebagian besar berasal dari beban bolak-balik, terutama siklus kerja pendingin ruangan.

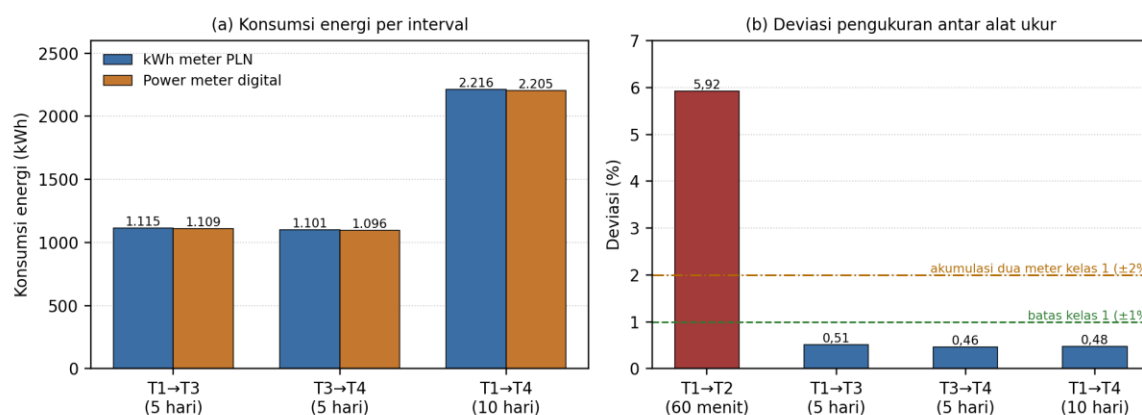
4.2 Konsumsi Energi dan Deviasi Pengukuran

Konsumsi energi tiap interval dihitung sebagai selisih pembacaan register energi kumulatif. Sebagai contoh, untuk interval Time-1 sampai Time-4 pada kWh meter PLN diperoleh 405.626,75 –

$403.410,67 = 2.216,08$ kWh, sedangkan pada power meter digital diperoleh $68.987,00 - 66.781,65 = 2.205,35$ kWh, sehingga selisih kedua pembacaan adalah 10,73 kWh dan deviasinya $(2.216,08 - 2.205,35) / 2.216,08 \times 100\% = 0,48\%$. Hasil perhitungan untuk seluruh interval disajikan pada Tabel 6 dan divisualkan pada Gambar 3.

Tabel 6. Konsumsi energi dan deviasi pengukuran tiap interval pengamatan

Interval	Durasi	ΔW PLN (kWh)	ΔW PMS (kWh)	Selisih (kWh)	Deviasi (%)
Time-1 → Time-2	1,00 jam	11,15	10,49	0,66	5,92
Time-1 → Time-3	120,88 jam	1.114,62	1.108,91	5,71	0,51
Time-3 → Time-4	119,25 jam	1.101,46	1.096,44	5,02	0,46
Time-1 → Time-4	240,13 jam	2.216,08	2.205,35	10,73	0,48



Gambar 3. Konsumsi energi kedua alat ukur dan deviasi pengukuran tiap interval

Hasil perhitungan memperlihatkan pola yang khas. Deviasi pada interval 60 menit tampak besar, yaitu 5,92%, namun deviasi pada interval lima hari dan sepuluh hari konsisten kecil pada kisaran 0,46% hingga 0,51%. Deviasi besar pada interval pendek dapat dijelaskan oleh dua hal. Pertama, basis energi pada interval tersebut hanya 11,15 kWh menurut kWh meter PLN, sehingga selisih absolut yang kecil sekalipun menghasilkan persentase yang besar. Selisih absolut pada interval 60 menit adalah 0,66 kWh, sedangkan pada interval sepuluh hari 10,73 kWh; artinya selisih absolut hanya tumbuh 16 kali lipat sementara basis energinya tumbuh 199 kali lipat. Kedua, kedua meter tidak dibaca pada detik yang persis sama karena pembacaan dilakukan berurutan pada dua panel yang berbeda. Dengan daya rata-rata site sekitar 9,2 kW, selisih waktu pembacaan satu menit saja sudah setara 0,15 kWh atau 1,4% dari basis energi interval 60 menit, sementara pada interval sepuluh hari kontribusinya hanya 0,007%. Evaluasi kesesuaian alat ukur karenanya lebih tepat didasarkan pada interval pengamatan yang panjang.

Pada interval sepuluh hari, deviasi sebesar 0,48% lebih kecil daripada benchmark $\pm 1\%$ kelas 1 menurut IEC 62053-21 [12]. Karena kelas akurasi aktual kedua meter tidak terdokumentasi, hasil ini tidak digunakan untuk menyatakan sertifikasi kelas meter, tetapi untuk menilai kewajaran selisih pengukuran. Secara teoritis, bila dua meter kelas 1 masing-masing berada pada batas kesalahan dengan arah berlawanan, perbedaan antarmeter dapat mendekati 2%; deviasi 0,48% setara sekitar 48% dari batas $\pm 1\%$ meter tunggal dan sekitar 24% dari perbedaan teoritis 2% tersebut. Nilai yang teramati juga lebih kecil daripada deviasi sekitar 1% hingga 2,1% yang dilaporkan pada perangkat pemantauan rancang bangun sebelumnya [2]. Konsistensi deviasi pada dua sub-periode lima hari yang

berurutan, yaitu 0,51% dan 0,46%, menunjukkan pola yang relatif stabil, meskipun pengamatan lebih panjang masih diperlukan. Bila dinyatakan sebagai laju, selisih pembacaan bertambah rata-rata 1,07 kWh per hari, dengan 1,13 kWh per hari pada sub-periode pertama dan 1,01 kWh per hari pada sub-periode kedua.

Daya rata-rata site pada interval sepuluh hari menurut kWh meter PLN adalah 2.216,08 kWh dibagi 240,13 jam atau 9,23 kW, sedangkan menurut power meter digital 9,19 kW. Bila dihitung untuk setiap sub-periode dengan durasi sebenarnya pada Tabel 2, daya rata-rata menurut kWh meter PLN adalah 9,22 kW pada interval Time-1 sampai Time-3 dan 9,24 kW pada interval Time-3 sampai Time-4. Sebaran hanya 0,02 kW atau 0,2% antar sub-periode menunjukkan pola pembebanan site memang stabil, sehingga selisih pembacaan yang teramati tidak dapat dijelaskan oleh perubahan karakter beban. Nilai tersebut juga wajar terhadap komposisi beban site, yaitu beban searah perangkat melalui rectifier sekitar 3,9 kW ditambah rugi konversi rectifier, beban pendingin ruangan, penerangan, dan beban bolak-balik pendukung lainnya. Konsistensi antara daya rata-rata hasil pengukuran energi dengan estimasi beban terpasang memperkuat kesahihan data konsumsi energi yang tercatat.

4.3 Profil Tegangan

Perbandingan pembacaan tegangan tiap fasa antara kedua meter pada titik waktu yang sama disajikan pada Tabel 7. Dari dua belas pasangan pembacaan, sebelas pasangan memiliki selisih di bawah 0,5% dan hanya satu pasangan, yaitu fasa S/B pada Time-2, yang selisihnya mencapai 1,79%. Selisih tunggal tersebut dapat dipengaruhi oleh fluktuasi tegangan sesaat dan ketidaksinkronan pembacaan karena kedua meter dibaca secara berurutan. Pada fasa yang sama, selisih pembacaan pada Time-1, Time-3, dan Time-4 berturut-turut hanya 0,04%, 0,09%, dan 0,18%, sehingga anomali pada Time-2 tidak berulang. Data yang tersedia belum cukup untuk menetapkan satu penyebab tunggal, tetapi secara umum pembacaan tegangan kedua meter menunjukkan konsistensi yang baik.

Tabel 7. Selisih pembacaan tegangan antara kWh meter PLN dan power meter digital

Titik waktu	Fasa	V PLN (V)	V PMS (V)	Selisih (V)	Selisih (%)
Time-1	R / A	223,2	223,4	0,2	0,09
	S / B	231,0	231,1	0,1	0,04
	T / C	226,3	226,0	0,3	0,13
Time-2	R / A	225,9	226,2	0,3	0,13
	S / B	228,9	233,0	4,1	1,79
	T / C	227,8	228,9	1,1	0,48
Time-3	R / A	227,2	227,5	0,3	0,13
	S / B	233,4	233,2	0,2	0,09
	T / C	232,1	232,9	0,8	0,34
Time-4	R / A	222,2	222,5	0,3	0,14
	S / B	226,4	226,8	0,4	0,18
	T / C	228,7	228,5	0,2	0,09

Rekapitulasi ketidakseimbangan tegangan berdasarkan data kWh meter PLN disajikan pada Tabel 8. Tegangan tiap fasa selama periode pengamatan berada pada rentang 222,2 hingga 233,4 V. Terhadap tegangan nominal 230 V [19], variasi tersebut berada pada kisaran -3,4% hingga +1,5%,

masih di dalam batas variasi tegangan pelayanan tegangan rendah yang lazim dipersyaratkan yaitu +5% dan -10%. Ketidakseimbangan tegangan tertinggi tercatat 1,84% pada Time-1, masih di bawah ambang 2% yang umum dijadikan acuan [17]. Ketiga indikator pada titik pengamatan terpenuhi secara bersamaan, yaitu rentang tegangan berada di dalam batas variasi pelayanan, ketidakseimbangan tegangan berada di bawah ambang pada keempat titik waktu, dan selisih pembacaan antar meter di bawah 0,5% pada sebelas dari dua belas pasangan. Atas dasar data pengamatan tersebut, kualitas tegangan pada site selama titik waktu yang diobservasi dapat dikategorikan baik.

Tabel 8. Ketidakseimbangan tegangan berdasarkan data kWh meter PLN

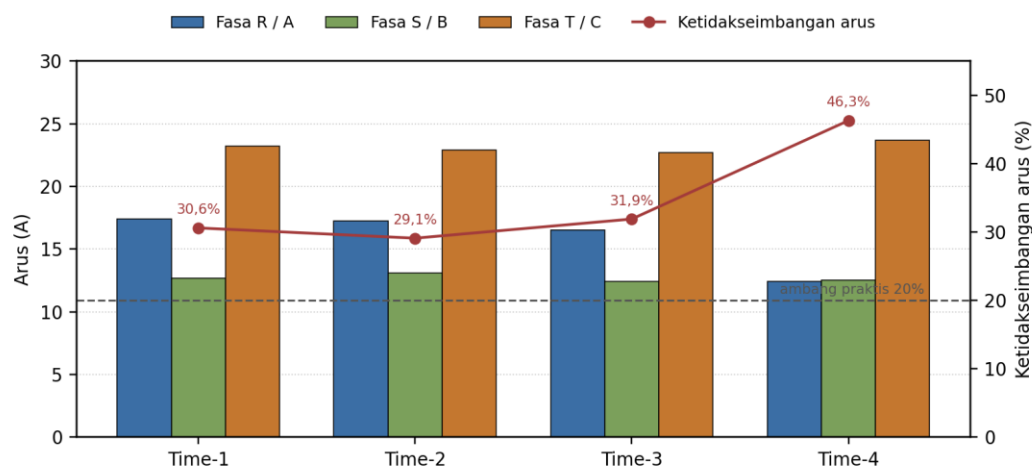
Titik waktu	V rata-rata (V)	Deviasi maks. (V)	Ketidakeimbangan (%)
Time-1	226,83	4,17	1,84
Time-2	227,53	1,63	0,72
Time-3	230,90	3,70	1,60
Time-4	225,77	3,57	1,58

4.4 Profil Arus dan Ketidakseimbangan Beban

Berbeda dengan profil tegangan yang baik, profil arus menunjukkan ketidakseimbangan beban yang signifikan. Sebagai contoh perhitungan pada Time-1, arus rata-rata ketiga fasa adalah $(17,40 + 12,70 + 23,20) / 3 = 17,77$ A dengan deviasi terbesar pada fasa T sebesar 5,43 A, sehingga ketidakseimbangan arus mencapai 30,6%. Hasil perhitungan untuk seluruh titik waktu berdasarkan data kedua alat ukur disajikan pada Tabel 9 dan divisualkan pada Gambar 4.

Tabel 9. Ketidakseimbangan arus menurut kWh meter PLN dan power meter digital

Titik waktu	I R/A (A)	I S/B (A)	I T/C (A)	Ketidakeimbangan menurut kWh meter (%)	Ketidakeimbangan menurut power meter (%)
Time-1	17,40	12,70	23,20	30,6	29,4
Time-2	17,23	13,10	22,90	29,1	31,0
Time-3	16,53	12,40	22,70	31,9	32,2
Time-4	12,40	12,50	23,70	46,3	46,2



Gambar 4. Profil arus tiap fasa dan ketidakseimbangan arus pada tiap titik waktu

Ketidakseimbangan arus site berada pada kisaran 29% hingga 46%, jauh melampaui ambang praktis 20% yang umum dijadikan indikator perlunya penataan ulang beban. Pola pembebanan menunjukkan fasa T atau fasa C secara konsisten memikul arus tertinggi pada kisaran 22,6 hingga 23,7 A, sedangkan fasa S atau fasa B secara konsisten terendah pada kisaran 12,0 hingga 13,1 A. Pada Time-4, arus fasa R turun ke 12,4 A mendekati fasa S sehingga ketidakseimbangan meningkat tajam menjadi 46,3%; penurunan tersebut kemungkinan berkaitan dengan siklus mati kompresor pendingin ruangan yang tersambung pada fasa itu.

Hasil perhitungan berdasarkan kedua alat ukur sangat konsisten, yaitu 29,1% hingga 46,3% menurut kWh meter PLN dan 29,4% hingga 46,2% menurut power meter digital. Konsistensi ini menguatkan temuan ketidakseimbangan beban site dan menunjukkan bahwa pola tersebut berasal dari distribusi beban, bukan semata-mata dari salah satu alat ukur. Selisih pembacaan arus sesaat antar meter umumnya di bawah 1%, kecuali fasa R/A pada Time-1 sebesar 2,9%. Pola ini tidak menunjukkan indikasi kesalahan rasio atau polaritas transformator arus yang besar, tetapi kelas akurasi transformator arus tetap tidak dapat dipastikan karena tidak terdokumentasi.

Mengacu pada hasil penelitian [10] yang berhasil menurunkan ketidakseimbangan dari 64,1% menjadi 1,2% melalui penyeimbangan beban antarfasa, peluang perbaikan pada site objek penelitian juga nyata. Pemindahan sebagian beban satu fasa dari fasa T ke fasa S diperkirakan menurunkan arus fasa tertinggi dari sekitar 23 A mendekati arus rata-rata 16 hingga 18 A, sehingga rugi-rugi penghantar yang sebanding dengan kuadrat arus berkurang dan kapasitas fasa T kembali sehat.

4.5 Faktor Potensial Penyebab Deviasi dan Implikasi Praktis

Deviasi pengukuran sebesar 0,48% dalam sepuluh hari dapat dipengaruhi oleh kombinasi beberapa faktor, namun penelitian ini tidak memisahkan kontribusi masing-masing faktor secara eksperimental. Faktor yang mungkin berkontribusi meliputi kesalahan intrinsik kedua alat ukur, karakteristik transformator arus pada power meter digital seperti rasio, kelas akurasi, dan kondisi pemasangan [14], perbedaan resolusi serta pembulatan digit tampilan, ketidaksinkronan waktu pembacaan, serta kemungkinan adanya beban kecil yang tercatat oleh kWh meter PLN tetapi berada di luar kanal 1 power meter digital. Konsistensi pembacaan power meter yang sedikit lebih rendah pada seluruh interval membuat hipotesis terakhir layak diperiksa, tetapi belum dapat dinyatakan sebagai penyebab pasti.

Konsistensi arah deviasi tersebut perlu ditindaklanjuti dengan pemeriksaan titik sambung pengukuran untuk memastikan seluruh beban yang tercatat meter transaksi juga melewati transformator arus kanal 1. Dari sisi besaran, deviasi yang terjadi relatif kecil terhadap benchmark yang digunakan dalam penelitian ini, sehingga nilai 0,48% saja belum cukup untuk menyimpulkan adanya kelainan alat ukur maupun kehilangan energi non-teknis yang signifikan.

Berdasarkan konsumsi sepuluh hari sebesar 2.216,08 kWh, konsumsi energi bulanan site dapat diproyeksikan sekitar 6.648 kWh atau sekitar 79,8 MWh per tahun dengan asumsi pola beban tetap. Deviasi 0,48% terhadap proyeksi bulanan tersebut setara sekitar 32 kWh per bulan. Nilai ini relatif kecil, namun bagi pengelola yang menangani ratusan site, deviasi kecil per site dapat terakumulasi dan layak dipantau dalam rekonsiliasi tagihan portofolio. Karena kelas akurasi aktual meter belum terdokumentasi, ambang $\pm 2\%$ sebaiknya dipakai hanya sebagai ambang internal sementara untuk memicu pemeriksaan lanjutan, bukan sebagai batas legal atau metrologis. Rekapitulasi bulanan data NMS perlu dibandingkan dengan rekening listrik, dan tata cara pembacaan

perlu diseragamkan agar evaluasi tidak didasarkan pada interval energi yang terlalu kecil dan sensitif terhadap pembulatan.

5. SIMPULAN

Selama periode pengamatan sepuluh hari, kWh meter PLN mencatat konsumsi energi sebesar 2.216,08 kWh sedangkan power meter digital kanal 1 mencatat 2.205,35 kWh, sehingga deviasi pengukuran antara kedua alat ukur adalah 10,73 kWh atau 0,48% dengan pembacaan power meter digital konsisten sedikit lebih rendah. Deviasi pada interval lima hari dan sepuluh hari berada pada kisaran 0,46% hingga 0,51% dan lebih kecil daripada benchmark $\pm 1\%$ kelas 1 yang digunakan dalam penelitian. Namun, karena kelas akurasi aktual kedua meter tidak terdokumentasi, hasil tersebut merupakan evaluasi kewajaran deviasi dan bukan verifikasi sertifikasi kelas meter. Deviasi 5,92% pada interval 60 menit tidak representatif untuk evaluasi jangka panjang karena basis energinya kecil dan dipengaruhi pembulatan digit serta ketidaksinkronan waktu pembacaan. Power meter digital dapat digunakan sebagai sarana pemantauan dan verifikasi internal awal terhadap tagihan listrik, tanpa menggantikan fungsi meter transaksi.

Profil tegangan site tergolong baik dengan rentang 222,2 hingga 233,4 V dan ketidakseimbangan tegangan maksimum 1,84%, sedangkan profil arus menunjukkan ketidakseimbangan beban yang signifikan pada kisaran 29% hingga 46% dengan fasa T atau C secara konsisten memikul arus tertinggi. Faktor yang berpotensi menjelaskan deviasi pengukuran meliputi kesalahan intrinsik alat ukur, karakteristik transformator arus, perbedaan resolusi tampilan, ketidaksinkronan waktu pembacaan, serta kemungkinan adanya beban kecil di luar kanal pengukuran power meter digital; kontribusi masing-masing faktor belum dipisahkan secara eksperimental. Pengelola site disarankan menata ulang distribusi beban satu fasa agar ketidakseimbangan arus turun di bawah ambang praktis 20%, memeriksa titik sambung pengukuran kanal 1, dan melakukan verifikasi silang kedua meter secara rutin. Penelitian selanjutnya dapat memanfaatkan data historis konsumsi energi beresolusi harian selama satu hingga tiga bulan agar selaras dengan siklus penagihan, menambahkan pengukuran faktor daya dan analisis harmonisa, serta membandingkan lebih dari satu site agar hasilnya lebih dapat digeneralisasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Lamongan atas dukungan akademik selama pelaksanaan penelitian, serta kepada pengelola site telekomunikasi yang telah memberikan izin pembacaan meter dan akses data sistem pemantauan jarak jauh sehingga penelitian ini dapat terlaksana.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] D. Gunawan, Y. Shalahuddin, and D. Erwanto, "Studi komparasi kWh meter pascabayar dengan kWh meter prabayar tentang akurasi pengukuran terhadap tarif listrik yang bervariasi," *Setrum*, vol. 7, no. 1, pp. 158–168, 2018.
- [2] M. N. Adiwiranto, C. B. Waluyo, and B. Sudibya, "Prototipe sistem monitoring konsumsi energi listrik serta estimasi biaya pada peralatan rumah tangga berbasis Internet of Things," *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 6, no. 1, pp. 32–41, 2022.
- [3] I. Chairunnisa and W. Wildian, "Rancang bangun alat pemantau biaya pemakaian energi listrik menggunakan sensor PZEM-004T dan aplikasi Blynk," *Jurnal Fisika Unand*, vol. 11, no. 2, pp. 249–255, 2022, doi: 10.25077/jfu.11.2.249-255.2022.

- [4] M. Dahlan, B. C. Wibowo, and S. Solekhan, "Monitoring besaran listrik instalasi menggunakan aplikasi Android," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 11, no. 2, pp. 77–84, 2022, doi: 10.35793/jtek.11.2.2022.39994.
- [5] K. G. Koukouvinos, G. K. Koukouvinos, P. Chalkiadakis, S. D. Kaminaris, V. A. Orfanos, and D. Rimpas, "Evaluating the performance of smart meters: insights into energy management, dynamic pricing and consumer behavior," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 2, Art. no. 960, 2025, doi: 10.3390/app15020960.
- [6] A. Babuta, B. Gupta, A. Kumar, and S. Ganguli, "Power and energy measurement devices: a review, comparison, discussion, and the future of research," *Measurement*, vol. 172, Art. no. 108961, 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108961.
- [7] G. Patrizi, C. Garzon Alfonso, L. Calandroni, A. Bartolini, C. Iturrino Garcia, L. Paolucci, F. Grasso, and L. Ciani, "Anomaly detection for power quality analysis using smart metering systems," *Sensors*, vol. 24, no. 17, Art. no. 5807, 2024, doi: 10.3390/s24175807.
- [8] N. Liu, H. Xu, S. Chang, K. Zheng, H. Liu, M. Zeng, and Y. Xiao, "Analysis and research on complex wrong wiring of primary smart watt-hour meter," in *Proc. IEEE 7th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conf. (IAEAC)*, Chongqing, China, 2024, pp. 1785–1789.
- [9] S. Mitra, B. Chakraborty, and P. Mitra, "Smart meter data analytics applications for secure, reliable and robust grid system: survey and future directions," *Energy*, vol. 289, Art. no. 129920, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2023.129920.
- [10] G. S. Wicaksono and T. Wrahatnolo, "Evaluasi ketidakseimbangan beban pada GTT 20 kV terhadap arus netral dan rugi daya," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 172–178, 2023, doi: 10.37905/jjee.v5i2.20139.
- [11] C. K. Alexander and M. N. O. Sadiku, *Fundamentals of Electric Circuits*, 6th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2017.
- [12] International Electrotechnical Commission, *IEC 62053-21: Electricity Metering Equipment (a.c.) – Particular Requirements – Part 21: Static Meters for Active Energy (Classes 1 and 2)*, Geneva, Switzerland: IEC, 2003.
- [13] International Electrotechnical Commission, *IEC 62053-11: Electricity Metering Equipment (a.c.) – Particular Requirements – Part 11: Electromechanical Meters for Active Energy (Classes 0,5, 1 and 2)*, Geneva, Switzerland: IEC, 2003.
- [14] International Electrotechnical Commission, *IEC 61869-2: Instrument Transformers – Part 2: Additional Requirements for Current Transformers*, Geneva, Switzerland: IEC, 2012.
- [15] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2012.
- [16] T. A. Short, *Electric Power Distribution Handbook*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.
- [17] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std 1159-2019: IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, New York, NY, USA: IEEE, 2019.
- [18] C. Sankaran, *Power Quality*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2002.
- [19] PT PLN (Persero), *SPLN 1:1995 Tegangan-Tegangan Standar*, Jakarta, Indonesia: PT PLN (Persero), 1995.
- [20] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, *Peraturan Menteri ESDM Nomor 27 Tahun 2017 tentang Tingkat Mutu Pelayanan dan Biaya yang Terkait dengan Penyaluran Tenaga Listrik oleh PT PLN (Persero)*, Jakarta, Indonesia: Kementerian ESDM, 2017.
- [21] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 6196:2011 Prosedur Audit Energi pada Bangunan Gedung*, Jakarta, Indonesia: BSN, 2011.
- [22] A. von Meier, *Electric Power Systems: A Conceptual Introduction*, Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2006.
- [23] Sugiyono, *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*, Bandung, Indonesia: Alfabeta, 2019.