

# Integrasi Sistem Pengolahan Data Pengukuran Energi Berbasis Scada Dan Kwh Meter: Studi Empiris Pada Trafo Distribusi

Ikhwani Faqih<sup>1</sup>, I Made Indradjaja Marcus Brunner<sup>2</sup>, Joko Muslim<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Magister Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN

Jl. Lingkar Luar Barat, Duri Kosambi, Cengkareng, Jakarta Barat, DKI Jakarta, 11750

Email: [ikhwani2310042@itpln.ac.id](mailto:ikhwani2310042@itpln.ac.id), [imade.brunner@itpln.ac.id](mailto:imade.brunner@itpln.ac.id), [jokomuslim@itpln.ac.id](mailto:jokomuslim@itpln.ac.id)

## ABSTRAK

Meningkatnya kebutuhan akan distribusi energi listrik yang andal, efisien, dan akurat mendorong penerapan teknologi pemantauan serta pengendalian yang semakin canggih. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggantian transduser konvensional dengan digital power meter terhadap validitas data pengukuran energi listrik, khususnya pada kWh meter yang dijadikan acuan. Studi dilakukan dengan pendekatan empiris pada trafo distribusi di Gardu Induk, melalui analisis dua sampel data yang dibandingkan menggunakan metode statistik Z-test, yaitu data load profile kWh meter dan log sheet SCADA. Penelitian juga menganalisis data SCADA sebelum dan sesudah integrasi dengan digital power meter dan kWh meter digital (smart meter) untuk menilai perbedaan akurasi pengukuran. Selanjutnya, ditelaah juga efektivitas akuisisi data secara real-time, peningkatan akurasi pengolahan data, serta interoperabilitas antar sistem. Hasil analisis menunjukkan bahwa integrasi SCADA dengan smart meter mampu meningkatkan akurasi pembacaan telemetering dan menghilangkan deviasi terhadap pengukuran energi aktual yang tercatat pada kWh meter. Integrasi ini berkontribusi dalam mendukung sistem distribusi tenaga listrik yang lebih modern, efisien, dan berbasis digital. Dengan demikian, studi ini memberikan kontribusi signifikan terhadap akurasi pengukuran SCADA dan pengembangan infrastruktur smart grid di Indonesia, serta memperkuat implementasi sistem pemantauan energi berbasis teknologi digital pada jaringan distribusi listrik.

**Kata Kunci:** SCADA, Telemetering, kWh meter, Smart Meter, Digital Power Meter, Transduser

## ABSTRACT

*The increasing demand for reliable, efficient, and accurate electrical energy distribution has driven the adoption of more advanced monitoring and control technologies. This study aims to analyze the impact of replacing conventional transducers with digital power meters on the validity of energy measurement data, particularly focusing on the kWh meter used as a reference. An empirical study was conducted on distribution transformers by comparing two data samples using the statistical Z-test method—load profile data from the kWh meter and log sheet data from SCADA. The research also examines SCADA data before and after integration with digital power meters and smart kWh meters to evaluate differences in measurement accuracy. Furthermore, the study assesses the effectiveness of real-time data acquisition, improvements in data processing accuracy, and system interoperability. The results indicate that integrating SCADA with smart meters significantly enhances telemetering accuracy and eliminates deviation from actual energy measurements recorded by the kWh meter. This integration supports the development of a more modern, efficient, and digitally based electrical distribution system. Therefore, the study provides a meaningful contribution to the advancement of smart grid infrastructure in Indonesia and strengthens the implementation of digital energy monitoring systems within the power distribution network..*

**Keywords:** SCADA, Telemetering, kWh meter, Smart Meter, Digital Power Meter, Transducer

## Pendahuluan

Unit Induk Pusat Pengatur Beban Jawa, Madura, dan Bali (UIP2B JAMALI) merupakan salah satu unit operasional di PT PLN (Persero) yang memiliki tanggung jawab utama dalam memantau serta mengendalikan sistem pengaturan beban pada wilayah Jawa, Madura, dan Bali. Fungsi utama dari unit ini adalah menjaga kestabilan dan keandalan sistem tenaga listrik, serta memastikan pasokan energi listrik yang efisien dan berkelanjutan bagi seluruh konsumen di wilayah tersebut. Sebagai pengelola operasi sistem kelistrikan, UIP2B JAMALI juga bertugas melakukan penjadwalan dan dispatch unit pembangkit, serta supervisi dan switching jaringan atau *grid* [1]. Unit yang mengoperasikan sistem tenaga listrik di wilayah Jawa Barat adalah Unit Pusat Pengatur Beban Jawa Barat (UP2B JABAR) sebagai Area Control Center (ACC) yang berlokasi di RCC Cigereleng.

Pengaturan operasi sistem tenaga listrik yang sangat besar memiliki potensi *big contingency* (kehilangan Unit Pembangkit, Transformator, Penghantar Listrik yang membuat sistem kritis bahkan berpotensi *Black out*), oleh karena itu diperlukan pengukuran secara lengkap dan aktual. Salah satu solusi untuk memudahkan pengoperasian pada pusat pengatur

beban dengan baik yaitu dengan meningkatkan kualitas availability SCADA yang selaras dengan dibangunnya Advance Control Center atau Smart Control Center (SCC) [2]. SCADA memiliki fungsi utama yaitu menyediakan data *telemetering*, *telesignaling*, *telecontrolling* secara *real time* yang mana data tersebut akan digunakan sebagai aplikasi *state estimator*, perhitungan *short circuit*, *contingency analysis* serta studi simulasi operasi [3]. Setiap perbaikan SCADA harus ditunjukkan manfaatnya bagi sistem operasi, karena jika *telemetering* SCADA yang digunakan sebagai variabel untuk melakukan perhitungan *state estimator* terdapat selisih atau bahkan anomali maka pemodelan akan menjadi keliru. Dengan model yang benar dan *real time*, PLN tidak perlu melakukan *trial and error* dengan sistem *real*, karena bisa dilakukan lewat pemodelan [4].

Pengukuran besaran listrik mencakup nilai arus, tegangan, daya aktif, power faktor, dan energi listrik. Untuk itu dibutuhkan alat pengukuran SCADA dan transaksi listrik yang didesain untuk mengukur dan menghitung daya yang terpakai dengan masukan berupa arus dan tegangan yang bersumber pada peralatan *High Voltage* seperti *Capacitive Voltage Transformer* (CVT) dan *Current Transformer* (CT) [5]. CVT berfungsi untuk mentransformasikan besaran tegangan listrik tinggi ke tegangan rendah sedangkan CT berfungsi untuk mentransformasikan besaran arus listrik yang tinggi ke besaran arus listrik yang lebih rendah, sehingga pengukuran menjadi lebih aman, akurat dan teliti [6]. Oleh karena itu dibutuhkan suatu alat untuk mengukur atau mengonversi besaran tersebut sehingga bisa dibaca oleh sistem SCADA dan kWh. Pada Gardu Induk Konvensional, pembacaan meter yang digunakan pada generasi awal masih menggunakan transduser yang memiliki akurasi > 0,5%, kelas akurasi Digital Power Meter yaitu sebesar 0,5%, sedangkan kelas akurasi peralatan transaksi tenaga Listrik (kWh Meter) sebesar 0,2% [7].

Bidang Operasi Sistem dan Perencanaan Evaluasi (OP SIS dan RENEV) sebagai pengguna fasilitas SCADA secara berkala menginformasikan adanya *bad data* SCADA. Dan pada tanggal 5 Februari 2025 terdapat laporan GI KUNGN 70 kV Bay Trafo 1 nilai pengukuran MW SCADA tercatat selisih 2% dengan MW pada kWh meter. Di lokasi tersebut sudah dilakukan penggantian transduser menjadi digital Power meter pada tanggal 4 Februari 2024, serta terpasang kWh meter yang memiliki spesifikasi untuk protokol komunikasi SCADA, berikut grafik data MW SCADA dan MW kWh.

Seiring dengan berjalannya waktu teknologi semakin berkembang, peralatan yang dahulu masih analog saat ini sudah serba digital. Misalnya peralatan transaksi tenaga Listrik (kWh meter) yang dahulu belum mendukung komunikasi berbasis protokol komunikasi SCADA (Modbus, DNP3, IEC 60870-5, dan IEC 61850) saat ini sudah bisa mendukung komunikasi dengan SCADA [8]. kWh meter menjadi komponen utama dalam bisnis tenaga listrik sebagai acuan pengukuran yang akurat karena menyangkut transaksi tenaga Listrik sebagai variabel nilai rupiah. Oleh karena itu untuk mengoperasikan kWh Meter yang dipasang tahap pengujian yang dilalui sangat ketat dan dilakukan oleh lembaga resmi yang ditunjuk PLN untuk sertifikasi layak operasi seperti PLN Pusat Sertifikasi (PUSERTIF) serta dilakukan kalibrasi pada kWh meter melewati proses pengujian dan pemberian tanda kalibrasi sah atau kalibrasi batal pada kWh meter, yang dilakukan oleh petugas yang berwenang untuk memastikan keakuratan alat ukur energi listrik tersebut [9]. Kalibrasi dilakukan pada kWh meter baru atau kWh meter yang mengalami masalah, untuk memastikan bahwa alat tersebut berfungsi dengan benar dan mencatat konsumsi energi secara akurat [10].

Populasi kWh meter di Gardu Induk yang sudah memiliki protokol komunikasi SCADA sudah terpasang cukup banyak, namun pemanfaatan untuk bisa dikomunikasikan dengan SCADA belum optimal. Disisi lain *telemetering* SCADA yang mengalami masalah akurasi dapat diperbaiki dengan cara mengintegrasikan kWh meter ke SCADA dan peluang efisiensi secara finansial tanpa harus mengganti transduser menjadi Digital Power Meter. Fungsi utama kWh meter adalah untuk transaksi energi listrik [11]. Namun kWh meter saat ini sudah termasuk dalam kategori *smart meter* yang mempunyai spesifikasi sebagai protokol komunikasi SCADA yang dapat dihubungkan ke perangkat *Remote station* dan *Master station*. Keuntungan lain dengan adanya optimalisasi kWh Meter dengan diintegrasikan ke SCADA adalah mengurangi adanya rangkaian CT/VT (*core meter*) yang dipasang banyak perangkat pengukuran, yang mana bisa mempengaruhi akurasi pembacaan meter dan *Burden CT* itu sendiri sesuai aturan pada *Grid Code 2020 - Permen ESDM No 20 Tahun 2020*. Dari sudut pandang sumber daya manusia yang mengelola aset meter dalam segi aktivitas pemeliharaan juga bisa digabungkan antara Tim SCADA dengan Tim kWh Transaksi Tenaga Listrik (TraTL) [12], [13].

*Teleinformasi* pada Gardu Induk membutuhkan data yang akurat, salah satunya adalah data *Telemetering* SCADA (MW, Mvar, kV, Ampere, Frekuensi, Faktor Daya) yang dibutuhkan untuk perhitungan beban sistem kelistrikan yang diolah, dianalisis dan dievaluasi. Berdasarkan hal tersebut, kinerja *telemetering* SCADA sangat bergantung pada besaran arus dan tegangan yang masuk ke dalam peralatan tersebut. Jika besaran arus atau tegangan tidak sesuai, akan menyebabkan kesalahan dalam pengukuran [14]. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya ketidakakuratan pembacaan meter SCADA. Untuk kasus ini diambil contoh perbandingan pembacaan akurasi meter pada Gardu Induk KUNGN 70 kV pada bay Transformator (Trafo) Distribusi 70/20 kV, meliputi Data Transduser SCADA, Data Digital Power Meter SCADA, dan Data kWh Meter [15]. Adapun tujuan dari penelitian ini yakni untuk mengetahui penyebab terjadinya kesalahan pengukuran sehingga terdapat deviasi antara pembacaan pada meter SCADA dengan meter kWh. Dalam hal ini meter kWh sebagai referensi meter yang akurat dalam menganalisis penyebab terjadinya deviasi.

## Metode Penelitian

Penelitian dan pengumpulan data dilaksanakan di PT. PLN (Persero) UIP2B JAMALI UP2B Jawa Barat Gardu Induk KUNGN 70 kV Bay Trafo 70/20 kV. Penelitian ini dilakukan mulai dari pengambilan data meter SCADA dan meter kWh, dan hasil pengujian pada peralatan menggunakan metode statistik analisis dua sampel dengan menggunakan data *analytic* pada MS Excel dengan periode penelitian menggunakan data pengukuran meter dimulai dari 2022 sampai dengan 2024. Kemudian dilakukan pengolahan data hingga analisis data. Waktu yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah 6 bulan mulai tanggal 03 Januari 2025 sampai dengan tanggal 10 Juni 2025. Pada penelitian ini membutuhkan teori pendukung dengan referensi tentang SCADA, Digital Power Meter, Teknologi terbaru dari kWh meter, protokol komunikasi IEC 61850, Modbus (Protokol komunikasi SCADA) dan teori penggunaan analisa statistik dua sampel. Penelitian ini juga membandingkan antara dua sumber data yang berbeda dengan waktu dan tempat yang sama untuk mendapatkan hasil analisis dua sampel.

Proses pengumpulan data dilakukan dengan melakukan unduh *load profile* data kWh dan log sheet data SCADA Gardu Induk KUNGN 70 kV pada bay Trafo-1 70/20 kV yang tersimpan pada server AMR dan SCADA di kantor PLN UP2B Jawa Barat. Serta dilakukan dengan melakukan survei ke lapangan terkait merk dan tipe alat yang terpasang serta melakukan pengecekan rangkaian *wiring* masukan arus dan tegangan pada kedua alat tersebut yang terpasang di gardu induk. Data *Mega Watt* pada meter SCADA dan kWh meter. Proses pengolahan data dilakukan penelitian dengan analisis dua sampel pada pengukuran daya aktif *Mega Watt* antara data SCADA dan data kWh. Kemudian kedua data tersebut memiliki perbedaan yang signifikan atau tidak. Jika tidak maka data *Telemetry* SCADA sudah akurat, namun jika ada perbedaan maka data SCADA akan diambil dari kWh meter dengan cara diintegrasikan melalui protokol komunikasi SCADA.

Metode analisis data menggunakan perbandingan dua data yang berbeda pada waktu dan tempat yang sama menggunakan pengumpulan data *load profile* dari ketiga meter yaitu meter kWh, transduser, dan Digital Power Meter serta data dianalisis pada MS Excel (Analisa dua sampel) dengan jumlah data dengan interval waktu 2022 sampai dengan 2024 pada beban Trafo yang dicatat setiap 30 menit dan tersimpan dalam *log sheet* dengan mencatat dan mengetahui nilai probabilitasnya. Referensi data pengukuran yang akurat adalah data dari kWh Meter Utama sebagai acuan karena sudah dilakukan kalibrasi rutin setiap 5 tahun sekali, dan tertuang pada aturan Protap PSA (Prosedur Tetap Transfer Tenaga Listrik) antara PLN UP2B dengan PLN UP2D revisi ke 2 tahun 2016.

## Hasil Dan Pembahasan

### Data Teknis

GI KUNGN 70 kV berada di lokasi Jl. RE. Martadinata No.1501, Cijoho, Kec. KUNGN, Kabupaten KUNGN, Jawa Barat 45513 yang secara administratif berada di wilayah provinsi Jawa Barat. Pemilihan sampel data penelitian yang digunakan berdasarkan pada beberapa pertimbangan strategis dan relevansi dengan tujuan penelitian. Salah satu alasan utama pemilihan lokasi ini adalah karena pernah terjadi gangguan Trafo yang dikarenakan *overload* beban dan di lokasi tersebut pernah dilakukan penggantian transduser menjadi Digital Power Meter pada tanggal 05 Februari 2024 namun berdasarkan data *log sheet* pada SCADA dan data *load profile* dari kWh meter mencatat masih menunjukkan deviasi sebesar  $(MW_{SCADA} = 18,23) - (MW_{kWh} = 17,87338) = 0,36$  MW sehingga pembacaan pengukuran selisihnya sebesar  $= 0,36/17,87338 \times 100\% = 2\%$ . Namun perlu dibuktikan apakah memiliki perbedaan yang signifikan atau tidak terhadap data *telemetry* SCADA dan kWh dengan analisis statistik.

Tabel 1. Log Sheet SCADA

2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	I3	;	05.02.2024	13:00	;	171.22	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	U1	;	05.02.2024	13:00	;	67.51	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	U2	;	05.02.2024	13:00	;	67.11	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	U3	;	05.02.2024	13:00	;	67.99	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	F	;	05.02.2024	13:00	;	49.98	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	P	;	05.02.2024	13:00	;	18.23	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	Q	;	05.02.2024	13:00	;	7.85	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	S	;	05.02.2024	13:00	;	19.85	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	I1	;	05.02.2024	13:30	;	170.64	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	I2	;	05.02.2024	13:30	;	174.75	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	I3	;	05.02.2024	13:30	;	174	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	U1	;	05.02.2024	13:30	;	66.63	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	U2	;	05.02.2024	13:30	;	66.37	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	U3	;	05.02.2024	13:30	;	67.22	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	F	;	05.02.2024	13:30	;	49.94	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	P	;	05.02.2024	13:30	;	18.23	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	Q	;	05.02.2024	13:30	;	7.85	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	S	;	05.02.2024	13:30	;	19.85	;	act
2KUNGN	;	70	;	TRF42-1	;	I1	;	05.02.2024	14:00	;	173.35	;	act

2KUNGN ;	70 ;	TRF42-1 ;	I2 ;	05.02.2024	14:00 ;	177.55 ;	act
2KUNGN ;	70 ;	TRF42-1 ;	I3 ;	05.02.2024	14:00 ;	176.1 ;	act

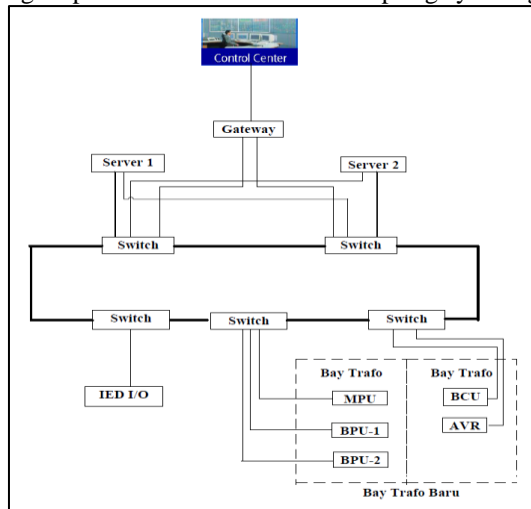
**Tabel 2.** Load Profile kWh

Date	kwh_out	kvarh_out	kv-r	kv-s	kv-t	ir	is	it	pf	mw_out	mvar_out
05/02/2024 10:00	8559.484	2889.031	11.78315	11.90223	11.78868	504.5176	516.5233	513.275	0.943876	17.11545	5.989402
05/02/2024 10:30	8581.118	3026.061	11.77938	11.8919	11.78248	505.0256	518.1207	515.5169	0.943077	17.13931	6.044152
05/02/2024 11:00	8615.8	3029.247	11.79147	11.89552	11.78943	510.6382	525.0013	519.6444	0.94365	17.34639	6.083521
05/02/2024 11:30	8697.024	3050.219	11.83295	11.93757	11.82581	506.2264	521.2914	516.0799	0.942154	17.24678	6.135681
05/02/2024 12:00	8687.553	3082.825	11.94743	12.06262	11.95651	509.8583	523.9491	519.0358	0.942665	17.5397	6.209744
05/02/2024 12:30	8797.058	3159.072	11.85373	11.97737	11.88054	517.0972	530.8869	528.4624	0.941155	17.65259	6.339171
05/02/2024 13:00	8848.399	3102.55	11.772	11.88576	11.78345	521.6515	535.5843	532.3993	0.943384	17.70735	6.226091
05/02/2024 13:30	8909.026	3032.931	11.64233	11.75605	11.6543	530.6769	545.2642	540.4485	0.946832	17.87338	6.073249
05/02/2024 14:00	9018.562	3065.309	11.68014	11.79346	11.69561	538.5045	549.938	547.7841	0.946199	18.14108	6.203969
05/02/2024 14:30	9110.855	3077.572	11.64328	11.76635	11.65303	545.5581	559.4053	556.9276	0.94747	18.39466	6.209615
05/02/2024 15:00	9103.401	3084.775	11.69113	11.80932	11.69667	535.0006	548.561	545.5856	0.946156	18.07621	6.18448
05/02/2024 15:30	9122.905	3065.073	11.67271	11.78736	11.67707	550.6818	565.3351	560.7719	0.952269	18.6927	5.992167
05/02/2024 16:00	9645.503	2945.234	11.65094	11.78739	11.66684	584.3738	599.9149	596.9561	0.962195	20.04296	5.673382
05/02/2024 16:30	9647.198	2503.587	11.70766	11.87196	11.76483	582.5444	592.2727	590.1856	0.97067	20.16696	4.994954
05/02/2024 17:00	9292.055	2167.915	11.92178	12.04607	11.95767	471.81	480.1434	477.6964	0.976478	16.69813	3.687155
05/02/2024 17:30	10445.65	2197.393	11.82454	11.96329	11.84989	602.2554	618.3743	615.3096	0.981349	21.37783	4.187646
05/02/2024 18:00	10704.66	2023.864	11.86059	11.99874	11.90425	607.3853	621.7275	617.2009	0.983931	21.63008	3.925081
05/02/2024 18:30	10863.15	1921.069	11.86323	12.00009	11.90365	610.5775	624.1814	619.7271	0.985482	21.76142	3.749073
05/02/2024 19:00	10741.93	1762.518	11.73877	11.87199	11.77792	601.1805	616.0099	611.223	0.987588	21.2725	3.383262
05/02/2024 19:30	10649.6	1657.981	11.71651	11.85461	11.75107	615.1131	630.2302	625.6782	0.986857	21.71168	3.555253
05/02/2024 20:00	10751.73	1726.125	11.75312	11.88871	11.79438	599.2675	612.3612	607.6059	0.987392	21.18954	3.396954
05/02/2024 20:30	10510.38	1693.653	11.77951	11.90753	11.81118	583.7286	598.59	593.3184	0.987322	20.71632	3.330534
05/02/2024 21:00	10139.19	1672.214	11.84387	11.96743	11.88855	557.3422	568.7092	565.9165	0.986203	19.82962	3.328487
05/02/2024 21:30	9722.297	1684.624	11.94559	12.06625	11.98074	531.6937	542.791	541.5208	0.98495	19.06947	3.346309
05/02/2024 22:00	9399.626	1703.893	11.98275	12.0999	12.00526	512.9548	524.4078	523.0086	0.983484	18.43276	3.392278
05/02/2024 22:30	8989.917	1604.924	11.6759	11.78144	11.69919	499.1729	509.8701	506.9533	0.986266	17.49469	2.929726
05/02/2024 23:00	8637.44	1466.11	11.70815	11.83086	11.73934	484.1977	493.296	495.0793	0.986077	17.04843	2.874957

Kemudian dilakukan pengumpulan data berupa data spesifikasi, *setting* konfigurasi dan *load profile* yang dicatat setiap 30 menit sekali melalui aplikasi *Automatic Meter Reading* (AMR) dan *log sheet* pada aplikasi SCADA. Kemudian dilakukan pengolahan data hingga analisis data.

**Konfigurasi SCADA Remote Station di GI KUNGN**

GI KUNGN merupakan GI lama yang sistem *Remote Station* sebelumnya adalah menggunakan *Remote Terminal Unit* (RTU), namun seiring berjalannya waktu RTU diganti bersamaan dengan penambahan pada *Bay Trafo Baru* (Trafo 3) dan Mengganti RTU *eksisting*. Mengacu pada SPLN S3.001-03-2021 Topologinya sebagai berikut:



**Gambar 1.** Konfigurasi SCADA GI KUNGN

**Analisa Dua Sampel**

Pembacaan meter SCADA yang digunakan sebagai pemantauan beban terindikasi adanya akurasi data yang kurang sesuai, pada saat itu sebelum tahun 2024 pengukuran SCADA masih menggunakan transduser, setelah dilakukan pengecekan ditemukan akurasi data yang belum sesuai, kemudian pada awal tahun 2024 dilakukan penggantian dengan Digital Power Meter. Pada tahun tersebut ada beberapa pilihan untuk perbaikan akurasi *telemetering* SCADA, yaitu mengganti transduser dengan Digital Power Meter atau mengintegrasikan kWh meter dengan SCADA, dan yang dilakukan adalah mengganti Digital Power Meter, namun berdasarkan pengamatan setelah dilakukan penggantian, nilai meter SCADA masih ada deviasi antara pembacaan pengukuran SCADA (Digital Power Meter) dengan kWh Meter. Oleh karena itu dilakukanlah Analisis dua sampel data tersebut apakah ada perbedaan yang signifikan.

Sebelum dilakukan perhitungan analisis statistik, pengolahan data dilakukan dengan mengumpulkan dan digabungkan dalam *file* yang sama, selanjutnya diurutkan berdasarkan tanggal dan waktu baik data SCADA ataupun data dari kWh, data yang diolah masing-masing diambil hanya besaran Mega Watt (MW) sebagai acuan data pengukuran.

**Tabel 3.** Perbandingan Data kWh dan Data SCADA

TIME	MW KWH	MW SCADA
01/01/2022 00:00	16.357162	16.68
01/01/2022 00:30	15.955975	16.35
01/01/2022 01:00	15.668545	16.1
01/01/2022 01:30	15.415334	15.65
01/01/2022 02:00	15.230124	15.65
01/01/2022 02:30	15.088889	15.42
01/01/2022 03:00	15.002857	15.2
01/01/2022 03:30	15.085035	15.2
01/01/2022 04:00	15.413483	15.63
01/01/2022 04:30	16.141842	16.42
01/01/2022 05:00	16.726677	16.87
01/01/2022 05:30	16.63349	16.99
01/01/2022 06:00	16.079491	16.29
01/01/2022 06:30	15.503819	15.84
01/01/2022 07:00	15.19241	15.6
01/01/2022 07:30	15.149795	15.48
01/01/2022 08:00	15.341033	15.58
01/01/2022 08:30	15.441879	15.59
01/01/2022 09:00	15.388755	15.82
01/01/2022 09:30	15.66153	15.94
01/01/2022 10:00	15.475172	15.71
01/01/2022 10:30	15.403506	15.59
01/01/2022 11:00	15.366239	15.59
01/01/2022 11:30	15.264557	15.61
01/01/2022 12:00	15.294612	15.61
01/01/2022 12:30	15.364727	15.49
01/01/2022 13:00	15.400428	15.73
01/01/2022 13:30	15.493709	15.73

**Menggunakan Data Analisis pada MS Excel (Z Test dua Sampel)**

**Tabel 4.** Descriptive Statistics Transducer

KWH MW		SCADA MW TRD	
Mean	17.59617904	Mean	17.88350712
Standard Error	0.01453849	Standard Error	0.014378008
Median	17.114421	Median	17.39
Mode	0	Mode	16.8
Standard Deviation	2.778639735	Standard Deviation	2.709863587
Sample Variance	7.720838778	Sample Variance	7.343360662
Kurtosis	4.744197826	Kurtosis	3.210682838
Skewness	-0.248098291	Skewness	0.067695342
Range	29.731643	Range	28.95
Minimum	-0.831371	Minimum	0.24
Maximum	28.900272	Maximum	29.19

Sum	642753.228	Sum	635257.94
Count	36528	Count	35522
Confidence Level (95,0%)	0.028495861	Confidence Level (95,0%)	0.028181338

Didapat nilai *sample variance 1* sebesar 7,720838778 dan *sample variance 2* sebesar 7,343360662 dengan nilai alfa sebesar 5% dan tingkat kepercayaan atau *Confident Interfal (CI) = 1 - alfa = 95%*, dengan demikian ketika diuji dengan *Z test* didapat nilai sebagai berikut :

**Tabel 5.** Test Two Sampel

	<i>KWH MW</i>	<i>SCADA MW TRD</i>
Mean	17.59617904	17.88350712
Known Variance	7.72084	7.34336
Observations	36528	35522
Hypothesized Mean Difference	0	
Z	-14.05208223	
P(Z<=z) one-tail	0	
z Critical one-tail	1.644853627	
P(Z<=z) two-tail	0	
z Critical two-tail	1.959963985	

Dari hasil tersebut didapat nilai T Kritis = 1,959963985, dan nilai T Hitung = -14,05208223, sedangkan nilai probabilitas lebih kecil dibandingkan nilai alfa, artinya bahwa, dengan CI 95% dan probabilitas < 0,05 = Tolak H<sub>0</sub>, artinya pengukuran SCADA menggunakan transduser memiliki perbedaan signifikan dengan pengukuran pada kWh meter, bahwa data *telemetering* SCADA dengan data meter kWh terdapat selisih. Referensi data meter yang valid adalah data dari kWh Meter Utama (MU) yang sudah diuji kalibrasi sesuai PROTAP 2016 [16].

a. Perbandingan data kWh Meter dengan SCADA Digital Power Meter (Sesudah Digital Power Meter)

Perbandingan dilakukan dengan rentang waktu 01/02/2024 00:00 sampai dengan 31/12/2024 10:30. Dari analisis statistik menggunakan dua sampel yaitu kWh meter dan meter SCADA didapatkan hasil sebagai berikut :

**Tabel 6.** Descriptive Statistics sesudah PM

<i>KWH MW</i>		<i>SCADA MW PM</i>	
Mean	18.51143722	Mean	19.18087995
Standard Error	0.02046736	Standard Error	0.021225204
Median	18.0044175	Median	18.6
Mode	0	Mode	17.63
Standard Deviation	2.593304149	Standard Deviation	2.687734456
Sample Variance	6.725226408	Sample Variance	7.223916508
Kurtosis	3.338257282	Kurtosis	3.441005215
Skewness	0.29290583	Skewness	0.298110485
Range	29.151191	Range	29.95
Minimum	-0.000058	Minimum	0
Maximum	29.151133	Maximum	29.95
Sum	297182.6132	Sum	307565.41
Count	16054	Count	16035
Confidence Level (95,0%)	0.040118313	Confidence Level (95,0%)	0.041603776

Didapat nilai *sample variance 1* sebesar 6,725226408 dan *sample variance 2* sebesar 7,223916508 dengan nilai alfa sebesar 5% dan *Confident Interfal (CI) = 1 - alfa = 95%*, dengan demikian ketika diuji dengan *Z test* didapat nilai sebagai berikut :

**Tabel 7.** Z-Test Two Sampel sesudah PM

	<i>KWH MW</i>	<i>SCADA MW PM</i>
Mean	18.51143722	19.18087995
Known Variance	6.725226408	7.223916508
Observations	16054	16035
Hypothesized Mean Difference	0	
Z	-22.70377562	
P(Z<=z) one-tail	0	

z Critical one-tail	1.644853627
P(Z<=z) two-tail	0
z Critical two-tail	1.959963985

Dari hasil tersebut didapat nilai T Kritis = 1,959963985 dan nilai T Hitung = -22,70377562, sedangkan nilai probabilitas lebih kecil dibandingkan nilai alfa, artinya bahwa, dengan tingkat kepercayaan CI 95% dan probabilitas < 0,05 = Tolak H0, Pengukuran SCADA menggunakan Digital Power Meter memiliki perbedaan signifikan dengan kWh meter, sesuai dengan perhitungan analisis tersebut terdapat selisih antara data *telemetry* SCADA dan kWh meter, meskipun sudah dilakukan penggantian untuk perbaikan data *telemetry* masih terdapat deviasi dan hasilnya masih belum sesuai harapan yaitu tidak adanya perbedaan data yang signifikan. Referensi data meter yang valid adalah kWh meter karena sudah diuji kalibrasi berdasarkan PROTAP tahun 2016 dan terpasang juga kWh Meter Pembanding (MP) [17].

b. Perbandingan data kWh Meter dengan SCADA dan gabungan data Transduser dan Power Meter

Perbandingan dilakukan dengan rentang waktu 01/01/2022 00:00 sampai dengan 31/12/2024 10:30. Dari statistik menggunakan dua sampel yaitu kWh meter dan meter SCADA didapatkan hasil berikut :

**Tabel 8.** Descriptive Statistics kWh dengan TRD dan PM

<i>MW KWH</i>		<i>MW SCADA</i>	
Mean	17.87561982	Mean	18.28700952
Standard Error	0.012017895	Standard Error	0.012194445
Median	17.403578	Median	17.78
Mode	0	Mode	17.63
Standard Deviation	2.755795308	Standard Deviation	2.76889089
Sample Variance	7.594407781	Sample Variance	7.66675676
Kurtosis	4.348615327	Kurtosis	3.058616956
Skewness	-0.126840116	Skewness	0.132139535
Range	29.982504	Range	29.95
Minimum	-0.831371	Minimum	0
Maximum	29.151133	Maximum	29.95
Sum	939935.8412	Sum	942823.35
Count	52582	Count	51557
Confidence Level(95,0%)	0.023555184	Confidence Level(95,0%)	0.023901233

Didapat nilai *sample variance 1* sebesar 7,59441 dan *sample variance 2* sebesar 7,66676 dengan nilai alfa sebesar 5% dan *Confident Interfal (CI) = 1 – alfa = 95%*, dengan demikian ketika diuji dengan *Z test* didapat nilai sebagai berikut :

**Tabel 9.** Z-Test Two Sampel kWh dengan TRD dan PM

	<i>MW KWH</i>	<i>MW SCADA</i>
Mean	17.87561982	18.28700952
Known Variance	7.59441	7.66676
Observations	52582	51557
Hypothesized Mean Difference	0	
Z	-24.02813374	
P(Z<=z) one-tail	0	
z Critical one-tail	1.644853627	
P(Z<=z) two-tail	0	
z Critical two-tail	1.959963985	

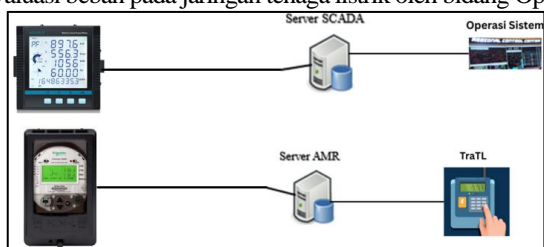
Dari hasil tersebut didapat nilai T Kritis = 1,959963985 dan nilai T Hitung = -24,02813374, sedangkan nilai probabilitas lebih kecil dibandingkan nilai alfa, artinya bahwa, dengan CI 95% dan probabilitas 0 < 0,05 = Tolak H0, Pengukuran SCADA memiliki perbedaan yang signifikan dengan kWh meter, sesuai dengan perhitungan analisis tersebut terdapat selisih antara *telemetry* SCADA dan kWh meter. Referensi data meter yang valid adalah kWh meter karena sudah diuji kalibrasi berdasarkan PROTAP tahun 2016 dan terpasang juga kWh Meter Pembanding (MP) [18], [19].

Dari hasil perhitungan analisis tersebut maka dapat disimpulkan bahwa pengukuran SCADA masih belum sesuai yang diharapkan dan masih belum akurat 100% jika dibandingkan dengan data dari kWh meter, maka perlu adanya metode atau cara lain untuk memperbaiki akurasi *telemetry* pada SCADA tersebut yaitu dengan integrasi data kWh meter ke peralatan SCADA *Remote Station* [20].

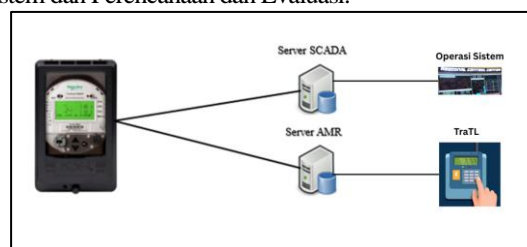
**Tabel 10.** Data kWh UP2B Jawa Barat Tahun 2024

MERK/TIPE	LOKASI / UPT				TOTAL
	UPT BANDUNG	UPT BOGOR	UPT CIREBON	UPT KARAWANG	
ION 8650	81	62	90	149	382
ION 8600	20	23	11	25	79
ION 8600 (A-BASE)	2	0	5	4	11
JEMSTAR	1	1	2	2	6
EDMI	36	31	36	47	150
TOTAL TITIK UKUR	628				

Berdasarkan Tabel 10, Merek/Tipe kWh yang sudah memiliki protokol komunikasi SCADA adalah ION 8650 sejumlah 382 unit kWh. Hasil akhirnya integrasi ini memiliki keuntungan bahwa satu alat kWh meter atau *smart meter* bisa digunakan fungsinya untuk dua kebutuhan yaitu untuk perhitungan transaksi tenaga listrik dan juga perhitungan analisis dan evaluasi beban pada jaringan tenaga listrik oleh bidang Operasi Sistem dan Perencanaan dan Evaluasi.



**Gambar 2.** Sebelum Integrasi kWh Smart Meter



**Gambar 3.** Setelah Integrasi kWh Smart Meter

**Melakukan Z test Dua Sampel Setelah Integrasi kWh Meter ke SCADA**

Setelah dilakukan integrasi antara kWh meter dan SCADA dilakukan analisis statistik *z-test* dua sampel dengan membandingkan MW kWh dan MW SCADA pada bulan Januari 2025 rentang waktu 01/01/2025 00:30 sampai dengan 31/01/2025 23:30. Dari analisis statistik menggunakan dua sampel yaitu data kWh meter dan meter SCADA setelah integrasi didapatkan hasil sebagai berikut :

**Tabel 11.** Descriptive Statistics Setelah Integrasi

MW KWH		MW SCADA	
Mean	17.44471996	Mean	17.44107599
Standard Error	0.058846088	Standard Error	0.058221091
Median	16.907766	Median	16.94
Mode	17.878344	Mode	16.52
Standard Deviation	2.269201597	Standard Deviation	2.245100704
Sample Variance	5.149275888	Sample Variance	5.040477173
Kurtosis	0.889779794	Kurtosis	0.829309333
Skewness	0.75236627	Skewness	0.741919656
Range	15.871708	Range	15.44
Minimum	10.211809	Minimum	10.26
Maximum	26.083517	Maximum	25.7
Sum	25940.29858	Sum	25934.88
Count	1487	Count	1487
Confidence Level(95.0%)	0.115430231	Confidence Level(95.0%)	0.114204262

Didapat nilai *sample variance 1* sebesar 5.149275888 dan *sample variance 2* sebesar 5.040477173 dengan nilai alfa sebesar 5% dan tingkat kepercayaan atau *Confident Interfal (CI) = 1 - alfa = 95%*, dengan demikian ketika diuji dengan *Z test* didapat nilai sebagai berikut :

**Tabel 12.** . Z test Dua Sampel Setelah Integrasi

	MW KWH	MW SCADA
Mean	17.44471996	17.44107599
Known Variance	5.149275888	5.040477173
Observations	1487	1487
Hypothesized Mean Difference	0	
Z	0.044019803	
P(Z<=z) one-tail	0.482444309	

z Critical one-tail	1.644853627
P(Z<=z) two-tail	0.964888619
z Critical two-tail	1.959963985

---

Dari hasil tersebut didapat nilai T Kritis = 1,959963985 dan nilai T Hitung = 0,044019803 dimana  $TK > TH =$  Terima  $H_0$ , artinya data tersebut tidak ada perbedaan yang signifikan atau sama, dan nilai probabilitas lebih kecil dibandingkan nilai  $\alpha$ , bahwa dengan tingkat kepercayaan CI 95% dan probabilitas = 0.964888618580918 >  $\alpha$  0,05 = Terima  $H_0$ , Pengukuran SCADA tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan meter kWh, sesuai dengan perhitungan analisis tersebut bahwa setelah dilakukan integrasi kWh dengan SCADA menunjukkan nilainya sudah tidak ada selisih antara SCADA dan kWh meter. Sehingga bisa diperoleh data *telemetering* SCADA sesuai yang diharapkan.

## Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, ditemukan bahwa pada data awal terdapat deviasi sebesar 2%. Hasil analisis statistik juga menunjukkan adanya perbedaan data yang signifikan antara nilai MW pada SCADA dan MW pada kWh meter. Pengujian dilakukan menggunakan z-test dua sampel melalui tiga tahap perbandingan. Tahap pertama adalah perbandingan antara data kWh meter dengan SCADA transduser sebelum penggantian ke power meter, dengan rentang waktu 1 Januari 2022 pukul 00.00 sampai 31 Januari 2024 pukul 23.30, dan hasilnya menunjukkan perbedaan yang signifikan. Tahap kedua adalah perbandingan antara data kWh meter dengan SCADA power meter setelah penggantian ke digital power meter, dengan rentang waktu 1 Februari 2024 pukul 00.00 sampai 31 Desember 2024 pukul 10.30, yang juga menunjukkan perbedaan data yang signifikan. Tahap ketiga adalah perbandingan antara data kWh meter dengan data gabungan SCADA transduser dan digital power meter dalam rentang waktu 1 Januari 2022 pukul 00.00 sampai 31 Desember 2024 pukul 10.30, dan hasilnya kembali menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan.

Nilai MW yang diharapkan setelah dilakukan penggantian transduser menjadi digital power meter seharusnya tidak memiliki perbedaan yang signifikan, atau setara dengan nilai MW yang tercatat pada kWh meter. Tujuan penggantian alat tersebut adalah untuk meningkatkan akurasi data telemetering SCADA. Namun, hasil pengujian statistik dua sampel menunjukkan bahwa penggantian tersebut belum mampu menghilangkan perbedaan signifikan antara data MW SCADA dan MW kWh. Oleh karena itu, dilakukan upaya perbaikan telemetering SCADA di Gardu Induk KUNGN 70 kV pada Bay Trafo 1 70/20 kV melalui integrasi kWh meter ke sistem SCADA.

Solusi integrasi kWh meter ke SCADA memiliki beberapa alternatif metode. Metode pertama adalah integrasi melalui protokol IEC 61850 ke perangkat remote station yang ada di gardu induk, dengan catatan harus tersedia switch hub yang mampu menggabungkan dua segmen IP address yang berbeda, yaitu antara IP SAS dan IP kWh. Metode kedua adalah integrasi melalui protokol Modbus serial RTU, dengan syarat remote station eksisting harus mendukung protokol modbus serial. Metode ketiga adalah integrasi melalui protokol Modbus TCP/IP RTU, yang memerlukan tambahan RTU dengan kemampuan modbus TCP/IP pada sisi master station. Berdasarkan hasil analisis statistik z-test dua sampel setelah integrasi kWh meter dengan SCADA dilakukan, diperoleh hasil bahwa data pengukuran daya aktif pada SCADA tidak lagi menunjukkan perbedaan yang signifikan dengan data pengukuran daya aktif pada kWh meter. Dengan kata lain, nilai MW SCADA telah sama dengan MW kWh, dengan deviasi sebesar 0%.

Terdapat saran untuk peneliti selanjutnya yakni dengan hasil analisis Z test dua sampel antara data kWh dengan data SCADA di GI KUNGN 70 kV pada bay Trafo 1 Distribusi 70/20 kV yang masih menggunakan transduser ataupun sudah menggunakan Power Meter Digital dapat disimpulkan terdapat selisih yang cukup signifikan terhadap kWh meter sebagai acuan referensi data yang valid, oleh karena itu saran untuk adanya perbaikan nilai akurasi data pengukuran SCADA dengan kWh meter yaitu dengan cara mengoptimalkan kWh utama yang sudah terpasang dan sudah memiliki kemampuan protokol komunikasi SCADA seperti merek/tipe ION 8650 atau smart meter, dapat diintegrasikan dengan SCADA di lokasi selain GI Kuningan 70 kV atau di wilayah PT PLN Persero Unit UP2B Jawa Barat. Dan hasil pengujian z-test setelah dilakukan integrasi menunjukkan bahwa pengukuran SCADA pembacaannya sudah sesuai yang diharapkan. Dari perhitungan analisis statistik z-test tersebut tidak disengaja menemukan data nilai MW kWh minimum yang seharusnya nilai minus tersebut tidak boleh terjadi pada Trafo Distribusi 70/20 kV dan nilainya sebesar -0.831371 pada descriptive statistic kWh dengan TRD dan PM. Setelah dianalisis ditemukan pada data load profile tanggal 15/11/2022 jam 10:30, diduga terbaca minus tersebut dikarenakan adanya faktor eksternal pada Trafo 1 yang belum diketahui penyebabnya, untuk mengetahui penyebab dari nilai minus tersebut bisa dilakukan penelitian lebih lanjut.

## Daftar Pustaka

- [1] F. X. Suryadi, L. Lisapaly, R. Sinambela, and T. H. Saputra, "Analisis Kinerja Sistem Distribusi Energi Listrik dan Optimalisasi Beban Berbasis Pengukuran Lapangan," vol. 17, no. 01, pp. 237–243, 2026, doi: 10.35970/infotekmesin.v17i1.2903.
- [2] F. M. Q. Silva, M. B. El Kattel, I. A. Pires, and T. A. C. Maia, "Development of a Supervisory System

- Using Open-Source for a Power Micro-Grid Composed of a Photovoltaic (PV) Plant Connected to a Battery Energy Storage System and Loads †,” *Energies*, vol. 15, no. 22, 2022, doi: 10.3390/en15228324.
- [3] S. H. Asman, N. F. Ab Aziz, U. A. Ungku Amirulddin, and M. Z. A. Ab Kadir, “Transient fault detection and location in power distribution network: A review of current practices and challenges in Malaysia,” *Energies*, vol. 14, no. 11, 2021, doi: 10.3390/en14112988.
- [4] M. S. Kulkarni *et al.*, “Enhancing grid resiliency in distributed energy systems through a comprehensive review and comparative analysis of islanding detection methods,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–27, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-62690-z.
- [5] B. Gladysz, T. anh Tran, D. Romero, T. van Erp, J. Abonyi, and T. Ruppert, “Current development on the Operator 4.0 and transition towards the Operator 5.0: A systematic literature review in light of Industry 5.0,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 70, no. March, pp. 160–185, 2023, doi: 10.1016/j.jmsy.2023.07.008.
- [6] G. Li *et al.*, “A cloud-edge collaborative optimization control strategy for voltage in distribution networks with PV stations,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 167, no. November 2024, 2025, doi: 10.1016/j.ijepes.2025.110632.
- [7] M. Sawilam, B. Kizilkaya, A. Taha, D. Flynn, M. A. Imran, and S. Ansari, “Impact of Virtual Power Plants on grid stability and renewable energy integration in smart cities using IoT,” *Energy Reports*, vol. 13, no. February, pp. 3312–3323, 2025, doi: 10.1016/j.egyr.2025.02.048.
- [8] V. L. Srinivas, J. Wu, B. Singh, and S. Mishra, “Hybrid state-estimation in combined heat and electric network using SCADA and AMI measurements,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 156, no. PA, p. 109726, 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109726.
- [9] P. Parsafar and P. Qaderi Baban, “Real-time fault diagnosis system for electrical panel using embedded systems,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 10, no. 1, 2023, doi: 10.1186/s43067-023-00107-z.
- [10] M. Kermani, B. Adelmanesh, E. Shirdare, C. A. Sima, D. L. Carni, and L. Martirano, “Intelligent energy management based on SCADA system in a real Microgrid for smart building applications,” *Renew. Energy*, vol. 171, pp. 1115–1127, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.03.008.
- [11] P. Neis, M. A. Wehrmeister, M. F. Mendes, and J. R. Pesente, “International Journal of Electrical Power and Energy Systems Applying a model-driven approach to the development of power plant SCADA / EMS software,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 153, no. July, p. 109336, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109336>
- [12] A. EL Zerk, M. Ouassaid, and Y. Zidani, “Development of a real-time framework between MATLAB and PLC through OPC-UA: A case study of a microgrid energy management system,” *Sci. African*, vol. 21, no. December 2021, p. e01846, 2023, doi: 10.1016/j.sciaf.2023.e01846.
- [13] L. Gu and F. Wang, “Integration and optimisation analysis of PLC and SCADA-HMI-IPC systems in intelligent power distribution monitoring,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 175, no. November 2025, p. 111597, 2026, doi: 10.1016/j.ijepes.2026.111597.
- [14] T. Ji and X. Xu, “Exploring the Integration of cloud manufacturing and cyber-physical systems in the era of industry 4.0 – An OPC UA approach,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 93, no. December 2024, p. 102927, 2025, doi: 10.1016/j.rcim.2024.102927.
- [15] C. Rohmingtluanga, S. Datta, N. Sinha, and T. S. Ustun, “SCADA based intake monitoring for improving energy management plan: Case study,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 402–410, 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2022.11.037.
- [16] V. K. Jamadade, M. G. Ghodke, S. S. Katakdhond, and V. Godase, “A Review on Real-time Substation Feeder Power Line Monitoring and Auditing Systems,” *Int. J. Emerg. IoT Technol. Smart Electron. Commun.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–16, 2025.
- [17] K. Santha Sheela, S. Vijayalakshmi, R. Swatheka, and T. Dharshana Assistant Professor, “International Journal of Multidisciplinary Research in Science, Engineering, and Technology,” *Online Pets Shop Manag. Syst.*, vol. 5, no. 6, pp. 1–12, 2022, [Online]. Available: [www.ijmrset.com](http://www.ijmrset.com)
- [18] M. Nuruzzaman and S. Rana, “Iot-Enabled Condition Monitoring in Power Distribution Systems: a Review of Scada-Based Automation, Real-Time Data Analytics, and Cyber-Physical Security Challenges,” *J. Sustain. Dev. Policy*, vol. 01, no. 01, pp. 25–43, 2025, doi: 10.63125/pyd1x841.
- [19] Muhamad Sadewa and Endi Permata, “Analisis Desain Kubikel 20kV untuk Peningkatan Efisiensi dan Keandalan Sistem Distribusi Listrik,” *Venus J. Publ. Rumpun Ilmu Tek.*, vol. 2, no. 6, pp. 116–129, 2024, doi: 10.61132/venus.v2i6.633.
- [20] F. M. Noor and A. F. Rahman, “Studi Penerapan Integrasi Sumber Energi Baru Terbarukan dengan Smart grid dan Sistem Pengendalian SCADA,” *Pros. Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 14, no. 1, pp. 526–532, 2023, doi: 10.35313/irwns.v14i1.5440.