

MODEL POWER METERING BERBASIS HAIWELL CLOUD SCADA UNTUK EFISIENSI ENERGI LISTRIK**Hendra Wahyu Pradana^{1*}, Subuh Isnur Haryudo²**^{1,2}Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya* hendra.19015@mhs.unesa.ac.id**ABSTRAK**

Efisiensi energi listrik menjadi fokus utama dalam lingkungan industri dan bisnis saat ini, seiring dengan meningkatnya biaya energi listrik dan kebutuhan akan sumber daya yang terbatas. Monitoring besaran listrik yang akurat dapat membantu pengguna untuk mengidentifikasi pola konsumsi energi listrik dan mengembangkan strategi untuk mengurangi konsumsi energi listrik yang dirasa kurang diperlukan. Dalam penelitian ini, digunakan metodologi penelitian yang dimulai dengan studi literatur untuk mengumpulkan informasi tentang sistem monitoring daya listrik, teknologi *Haiwell Cloud Scada* dalam pengumpulan data, dan teknik penghematan energi yang dapat diterapkan dalam sistem kelistrikan. Penelitian ini dilakukan dengan merancang sistem yang terdiri dari *power meter*, komunikasi data, SCADA, dan perangkat lunak untuk analisis data, dan melakukan implementasi dengan menginstal dan mengkonfigurasi setiap komponen. Hasil perbandingan pembacaan tegangan, arus, frekuensi, dan daya nyata antara pembacaan pada *power meter* dengan pembacaan pada sistem SCADA menunjukkan *error* yang rendah dan hasil analisis data diharapkan dapat membantu pengguna dalam mengidentifikasi potensi penghematan energi listrik dan mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan.

Kata kunci: Efisiensi Energi Listrik, *Monitoring*, *Power Meter*, *Haiwell Cloud Scada***1. PENDAHULUAN**

Efisiensi energi listrik menjadi fokus utama dalam lingkungan industri dan bisnis saat ini, seiring dengan meningkatnya biaya energi listrik dan kebutuhan akan sumber daya yang terbatas (Batouta, Aouhassi, and Mansouri 2023). Tingginya biaya energi listrik juga menjadi tantangan utama bagi perusahaan dalam upaya mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan (Fatras et al. 2022). Oleh karena itu, monitoring konsumsi energi listrik yang akurat dan efektif menjadi penting dalam upaya mencapai tujuan ini. Dalam artikel ilmiah ini, akan membahas tentang model *power metering* berbasis *Haiwell Cloud Scada* untuk monitoring konsumsi energi listrik yang efektif dan efisien.

Peningkatan efisiensi energi listrik dapat dicapai dengan berbagai cara, salah satunya adalah dengan monitoring konsumsi energi listrik dan parameter besaran listrik lainnya dengan akurat dan efektif (Abdulsalam et al. 2023). Monitoring besaran listrik yang akurat dapat membantu pengguna untuk mengidentifikasi pola konsumsi energi listrik dan mengembangkan strategi untuk mengurangi konsumsi energi listrik yang tidak perlu (Jasim et al. 2023). Namun, monitoring konsumsi energi listrik yang efektif dapat menjadi tantangan bagi pengguna, terutama bagi pengguna yang memiliki sistem yang tersebar di beberapa tempat. Oleh karena itu, diperlukan solusi pengukuran konsumsi energi listrik yang efektif dan efisien.

Memonitoring penggunaan energi listrik merupakan manfaat dari pengukuran besaran listrik secara *real time* (Badruzzaman 2020). Pemantauan ini bertujuan agar memperoleh data terbaru serta data yang sudah didapat bisa diolah agar memperoleh peluang efisiensi energi listrik.

Real time monitoring informasi besaran energi listrik diukur menggunakan kWh meter digital (Sossenheimer et al. 2021). Dalam perkembangannya, kWh meter digital sering disebut *power meter logic* (Rezaeimozafar et al. 2022). Alat ini berguna untuk membaca dan menampilkan tegangan, arus, frekuensi, faktor daya, dan parameter lainnya (Oyelami et al. 2021). *Power meter* dibekali fasilitas *data logger* yang sangat berguna sebagai media penyimpanan analisa penggunaan energi listrik dan data pengukuran (Imam Sya'roni et al. 2023).

Power meter adalah alat ukur listrik lebih banyak digunakan sebab pembacaannya yang lebih praktis serta memiliki fitur yang lebih banyak dibanding kWh meter analog (Teng, Setiadji, and Lim 2018). Banyak *power meter* yang sudah dilengkapi sistem komunikasi data sehingga memungkinkan melakukan pengukuran dari jarak jauh (Kumar et al. 2021). Sistem seperti ini sering disebut telemetri.

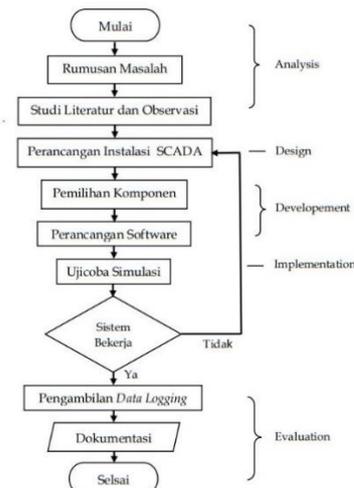
Komunikasi serial RS-485 menggunakan protokol *Modbus RTU* merupakan sistem komunikasi data yang digunakan *power meter* (Teng, Setiadji, and Lim 2018). Data *Modbus* dikirim melalui *port serial RS-485* dengan menggunakan 2 kabel untuk berkomunikasi dengan jarak maksimum mencapai 1200 meter atau 1.2 km (Liang et al. 2021).

Supervisory Control and Data Acquisition atau SCADA ialah sistem kendali industri berbasis personal komputer yang digunakan sebagai *monitoring system*, *control system*, akuisisi data ataupun penyajian data perangkat di proses industri (Rohmingtluanga et al. 2023). Agar bisa menampilkan data yang terdapat pada *data logger power meter* melalui layar monitor komputer menggunakan SCADA.

2. METODE

2.1 Pendekatan Penelitian

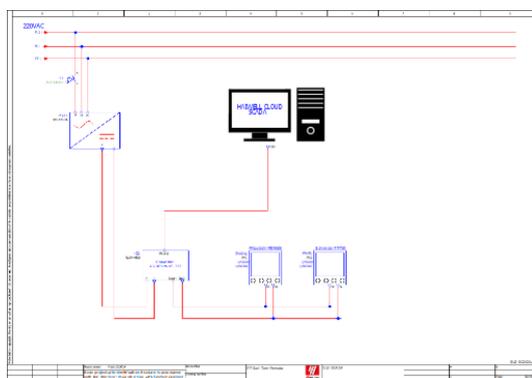
Penelitian ini menggunakan metodologi penelitian yang dimulai dengan studi literatur untuk mengumpulkan informasi tentang sistem monitoring daya listrik, teknologi *Haiwell Cloud Scada* dalam pengumpulan data, dan teknik penghematan energi yang dapat diterapkan dalam sistem kelistrikan. Selanjutnya, peneliti merancang sistem yang terdiri dari *power meter*, komunikasi data, SCADA, dan perangkat lunak untuk analisis data, dan melakukan implementasi dengan menginstal dan mengkonfigurasi setiap komponen. Pengukuran daya listrik dilakukan menggunakan *power meter* dan data dihubungkan ke SCADA. Pada tahap pengumpulan data, peneliti mengumpulkan data dari sistem yang telah diimplementasikan selama beberapa periode waktu, termasuk pengukuran daya listrik, konsumsi energi, dan parameter besaran listrik lainnya. Selanjutnya, peneliti melakukan analisis data dengan cara membandingkan pembacaan *power meter* dengan SCADA dan juga perbandingan dengan perhitungan matematis.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

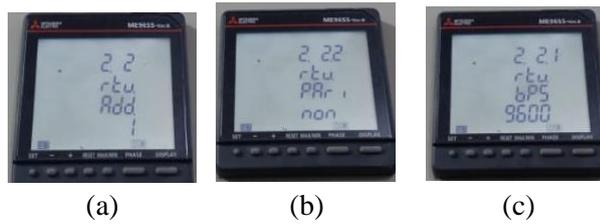
2.2 Desain

Desain wiring komunikasi serial RS-485 dimulai dari *Remote Terminal Unit* (RTU) yang terletak paling dekat dengan unit PC yang digunakan untuk memonitoring sistem SCADA. Pada sistem ini ada empat buah power meter yang akan digunakan dalam penelitian. Menggunakan *power meter Mitsubishi ME96SS* dan *Schneider PM750*. Hal ini memerlukan penyesuaian dalam pengaturan konfigurasi sistem SCADA agar dapat membaca dan memantau kedua jenis *power meter* tersebut secara akurat dan konsisten. Dibawah ini adalah gambar wiring protokol komunikasi RS-485.



Gambar 2. Wiring Protokol Komunikas RS-485

Pengaturan parameter komunikasi serial seperti *baudrate*, *parity*, *data bit*, dan *stop bit* merupakan faktor penting dalam memastikan kelancaran komunikasi antara perangkat *power meter* dengan PC pada sistem SCADA. Pengaturan nilai-nilai tersebut harus sesuai dengan konfigurasi yang ditentukan oleh *power meter Schneider PM750*, *Mitsubishi ME96SS*, dan PC untuk memastikan perangkat dapat berkomunikasi. Dalam *project* ini, nilai *baudrate* yang dipilih adalah 9600 dan *parity* yang digunakan adalah *none*. Adapun pentingnya memastikan pengaturan parameter yang sama pada setiap elemen komunikasi adalah untuk menjaga kelancaran jalannya proses komunikasi serial.



Gambar 3. (a) Setting *Adress*; (b) Setting *Parity*; (c) Setting *Baudrate Power Meter ME96SS*

Sesuai wiring protokol komunikasi, *power meter ME96SS* menggunakan *addres 1* dan untuk *Power meter PM750* menggunakan *addres 2*. Kemudian untuk *parity* dapat disetting *none* dan *baudrate* disetting 9600.



Gambar 4. Setting Komunikasi *Power Meter PM750*

2.3 Energi Listrik

Listrik merupakan definisi dari perkalian antara waktu dengan daya. Daya sendiri merupakan perkalian antara tegangan dan arus listrik, sehingga dalam mencari besaran-besaran energi selalu melibatkan kuat arus, tegangan, dan waktu (Rahayu 2020).

Energi listrik (*W*) merupakan hasil dari penghitungan perkalian antara daya listrik (*P*) dan waktu (*t*). Sedangkan daya listrik (*P*) sendiri merupakan hasil perkalian antara arus listrik (*I*) dan tegangan (*V*) (Rahayu 2020).

Tegangan (*V*) dapat diartikan sebagai energi yang dibutuhkan untuk memindahkan satu muatan (sebesar satu *coulomb*) dari satu elemen atau komponen asal terminal atau kutub yang satu ke terminal atau kutub yang lainnya. Alternatifnya, jika satu muatan sebesar satu *coulomb* dipindahkan dari satu terminal ke terminal lainnya, maka akan terdapat perbedaan potensial antara kedua terminal atau kutub. Keterkaitan antara kerja sebenarnya dan energi yang dilepaskan menggambarkan pengertian ini secara lebih sederhana, yaitu tegangan merupakan energi per satuan muatan (Widodo 2013).

Secara matematis :

$$v = \frac{dw}{dq} \dots\dots\dots 1$$

Arus listrik adalah suatu aliran elektron yang mengalir terus-menerus pada suatu konduktor akibat adanya ketidakseimbangan jumlah elektron di beberapa lokasi. Satuan arus listrik diukur dalam *ampere* (A). Satu arus listrik berarti bahwa 628 x 10¹⁶ elektron mengalir setiap detik melalui suatu penampang konduktor, yang setara dengan satu *coulomb* per detik (Herandy and Suprianto 2019).

$$i = \frac{q}{t} [Ampere] \dots\dots\dots 2$$

Dimana :

q = Jumlah muatan listrik dalam satuan *coulomb*.

i = Arus listrik diukur dalam satuan *ampere*.

t = waktu (detik)

2.4 Daya Listrik

Daya listrik mengacu pada kecepatan transfer energi listrik dalam suatu rangkaian. Pada arus bolak-balik (AC), gelombangnya biasanya berbentuk sinusoida dan terdiri dari tiga jenis daya, yakni daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S) (Hudan, Ivan Safril 2019). Watt (W) adalah satuan internasional yang digunakan untuk mengukur daya listrik. Satuan ini didefinisikan sebagai kuantitas usaha yang dilakukan oleh sumber tegangan dalam mengalirkan arus listrik dalam satu unit waktu, yang setara dengan *joule per detik* (J/s) (Boylestad, Robert, and Boylestad 2003).

Daya aktif (*real power*) memiliki satuan Joule/detik atau watt. Umumnya, daya aktif adalah jenis daya yang dapat diubah menjadi bentuk kerja lainnya. (Rahayu 2020). Daya aktif memiliki symbol P .

Persamaan diperoleh untuk mendapatkan daya aktif (*real power*):

$$P = V.I.\cos\theta \text{ (kW)} \dots\dots\dots 3$$

Dimana :

V = Tegangan dengan satuan *Volt*.

I = Arus listrik diukur dalam satuan *ampere*.

$\cos\theta$ = Faktor Daya

Daya reaktif (*reaktive power*) adalah kuantitas daya yang dibutuhkan untuk menghasilkan medan magnet dan fluks magnetik. Satuan yang digunakan untuk mengukur daya reaktif adalah *volt-ampere reactive* (VAR).

Persamaan diperoleh untuk mendapatkan daya reaktif (*reaktive power*):

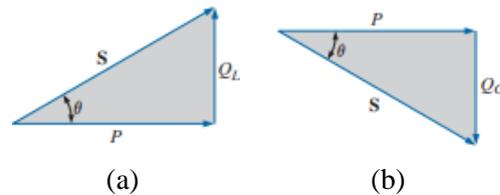
$$Q = V.I.\sin\theta \text{ (kVAR)} \dots\dots\dots 4$$

Hasil penjumlahan geometris dari daya aktif dan daya reaktif membentuk daya nyata (*apparent power*). Daya nyata mencakup total daya yang dihasilkan oleh sumber listrik dan didistribusikan ke konsumen. Satuan yang digunakan untuk mengukur daya nyata adalah *volt-ampere* (VA).

Persamaan diperoleh untuk mendapatkan daya nyata (*apparent power*).

$$S = V.I \text{ (kVA)} \dots\dots\dots 5$$

Pada sistem distribusi yang terdiri dari unsur daya aktif dan daya reaktif, transmisi daya kompleks atau daya nyata terjadi ketika terdapat gelombang arus dan tegangan sinusoidal dengan frekuensi yang sama. Meskipun tidak sepenuhnya dimanfaatkan, unsur daya reaktif tetap disuplai untuk menjaga keseimbangan sistem daya. Diagram vektor sering kali dipergunakan untuk menjelaskan hubungan matematis yang terdapat antara daya nyata, daya aktif, dan daya reaktif pada sistem listrik sinusoidal. Hubungan ketiganya dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Hubungan Antara Daya Nyata, Daya Aktif dan Daya Reaktif (a); Untuk Beban Induktif (b) Untuk Beban Kapasitif (Sumber: Robert, and Boylestad 2003)

2.5 Pengembangan

Setelah pembuatan wiring dan mengetahui teori dasar dari objek penelitian maka dapat dilakukan pemilihan dan melengkapi komponen-komponen apa saja yang dibutuhkan. Komponen yang dibutuhkan seperti *PC*, *power meter*, *software SCADA*, *converter RS-485 to RS-232*, *converter serial RS-232 to USB*, *power supply 24VDC*, kabel komunikasi *Modbus RTU*, *Current Transformator (CT)*, *Software Elpalne Electric P8*, *Software Modbus Poll*.

Setelah semua komponen yang dibutuhkan terpenuhi maka dapat dimulai untuk melakukan tahap selanjutnya yaitu pembuatan sistem SCADA sesuai desain yang dirancang. Pembuatan sendiri dimulai dari persiapan pengkabelan, sistem komunikasi hingga pembuatan program SCADA. Setelah pengkabelan dan komunikasi selesai baru dilakukan pemrograman.

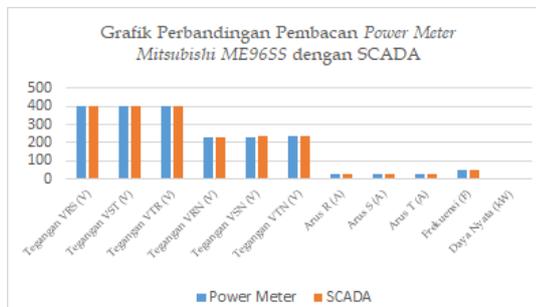
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian perbandingan pembacaan tegangan, arus, frekuensi, dan daya nyata. Pengujian ini diperlukan untuk mengidentifikasi nilai *error* antara pembacaan pada *power meter* dengan pembacaan pada sistem SCADA. Dengan mengetahui nilai *error* tersebut, maka dapat dihitung tingkat ketepatan sistem monitoring SCADA dalam mengambil data. Berikut ini adalah tabel perbandingan pembacaan pada power meter dengan SCADA yang ditampilkan Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Hasil Perbandingan Pembacaan *Power Meter Mitsubishi ME96SS* dengan SCADA

No	Parameter	Pembacaan <i>Power Meter</i>	Monitoring SCADA	Nilai <i>Error</i> (%)
1	Tegangan RS (V)	404	404	0
2	Tegangan ST (V)	404.1	404.5	0.09
3	Tegangan TR (V)	403	403.3	0.07
4	Tegangan RN (V)	233	233.2	0.08
5	Tegangan SN (V)	233.2	233.3	0.04
6	Tegangan TN (V)	233.4	233.6	0.08
7	Arus R (A)	27	27	0
8	Arus S (A)	28	28	0
9	Arus T (A)	28	28	0
10	Frekuensi (Hz)	404	404	0
11	Daya Nyata (kW)	404.1	404.5	0.09

Tabel 4.1 menggambarkan data *error* pembacaan parameter besaran listrik dari *power meter Mitsubishi ME96SS*, serta data yang termonitoring pada SCADA. Selanjutnya, hasil perbandingan antara pembacaan *power meter* dan SCADA disajikan dalam bentuk gambar melalui grafik yang dihasilkan Gambar 6 dibawah ini.



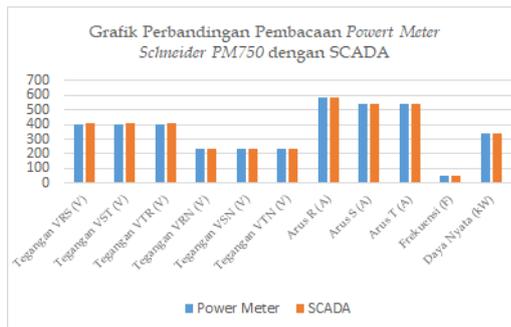
Gambar 6. Grafik Perbandingan *Power Meter Mitsubishi ME96SS* dengan SCADA

Gambar 6 merupakan representasi visual perbandingan antara pembacaan *power meter Mitsubishi ME96SS* dan monitoring SCADA. Berdasarkan hasil pengujian yang diperoleh, tercatat adanya nilai kesalahan (*error*) pada beberapa parameter tegangan, yakni tegangan ST dengan tingkat kesalahan (*error*) sebesar 0,09%, tegangan TR dengan tingkat kesalahan (*error*) sebesar 0,07%, tegangan RN dengan tingkat kesalahan (*error*) sebesar 0,08%, tegangan SN dengan tingkat kesalahan (*error*) sebesar 0,4%, serta tegangan TN dengan tingkat kesalahan (*error*) sebesar 0,08%. Selain itu, pada parameter tegangan RS, arus R, arus S, arus T, frekuensi, dan daya nyata tidak terdapat kesalahan (*error*).

Tabel 2 Hasil Perbandingan Pembacaan *Power Meter Schneider PM750* dengan SCADA

No	Parameter	Pembacaan <i>Power Meter</i>	Monitoring SCADA	Nilai <i>Error</i> (%)
1	Tegangan RS (V)	405	405.1	0.024
2	Tegangan ST (V)	405	405.2	0.049
3	Tegangan TR (V)	405	405.4	0.098
4	Tegangan RN (V)	234	234.3	0.128
5	Tegangan SN (V)	234	234	0
6	Tegangan TN (V)	234	234.2	0.085%
7	Arus R (A)	584	584	0
8	Arus S (A)	540	540	0
9	Arus T (A)	538	538	0
10	Frekuensi (Hz)	50.06	50.06	0
11	Daya Nyata (kW)	405	405.1	0.024

Tabel 2 menggambarkan data *error* pembacaan parameter besaran listrik dari *power meter Schneider PM750*, serta data yang termonitoring pada SCADA. Selanjutnya, hasil perbandingan antara pembacaan *power meter* dan SCADA disajikan dalam bentuk gambar melalui grafik yang dihasilkan Gambar 7 dibawah ini.



Gambar 7. Grafik Perbandingan *Power Meter Schneider PM750* dengan SCADA

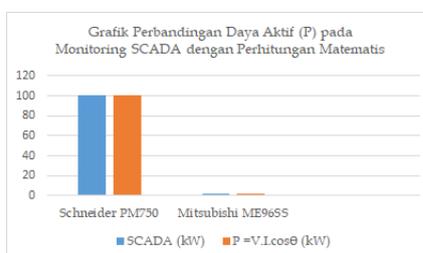
Gambar 7 merepresentasi visual perbandingan antara pembacaan *power meter Schneider PM750* dan monitoring SCADA. Berdasarkan hasil pengujian yang diperoleh, tercatat adanya nilai kesalahan (*error*) pada beberapa parameter tegangan, yakni tegangan RS dengan tingkat kesalahan (*error*) sebesar 0,024%, tegangan ST dengan tingkat kesalahan (*error*) sebesar 0,049%, tegangan TR dengan tingkat kesalahan (*error*) sebesar 0,098%, tegangan RN dengan tingkat kesalahan (*error*) sebesar 0,128%, serta tegangan TN dengan tingkat kesalahan (*error*) sebesar 0,028%. Selain itu, pada parameter tegangan SN, arus R, arus S, arus T, frekuensi, dan daya nyata tidak terdapat kesalahan (*error*).

Dalam rangka menguji keakuratan sistem monitoring SCADA pada skripsi ini, dilakukan pengujian daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya nyata (S) dengan cara membandingkan nilai yang termonitoring pada sistem SCADA dengan nilai daya reaktif yang diperoleh dari perhitungan matematis. Dibawah ini disajikan tabel hasilnya.

Tabel 3 Hasil Pengujian Pengukuran Daya Aktif (P)

No	Power Meter	Monitoring SCADA (kW)	$P = V.I.cos\theta$ (kW)	Nilai Error (%)
1	Mitsubishi ME96SS	2.2	2.2	0
2	Schneider PM750	100	100.2	0.1

Tabel 3 memaparkan sekumpulan data yang terdiri dari nilai kesalahan (*error*) rata-rata hasil pemantauan SCADA berdasarkan perhitungan matematis daya aktif. Dalam konteks ini, dengan merujuk pada gambar grafik yang disajikan, terlihat dengan jelas adanya perbandingan antara pembacaan daya reaktif pada SCADA dan hasil perhitungan matematis yang dilakukan.



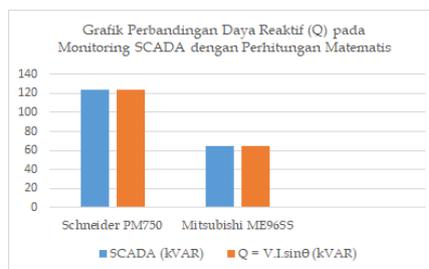
Gambar 8. Grafik Perbandingan Daya Aktif pada SCADA dengan Perhitungan Matematis

Gambar 8 menampilkan grafik perbandingan daya aktif yang terpantau pada sistem SCADA dengan hasil perhitungan matematis dari masing-masing *power meter*. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh data bahwa terdapat kesalahan (*error*) pada nilai daya reaktif tersebut. Adapun, nilai kesalahan (*error*) yang didapatkan untuk *power meter PM750* adalah sebesar 0.1%, sedangkan untuk *power meter Mitsubishi ME96SS* tidak terdapat kesalahan (*error*) yang terdeteksi.

Tabel 4 Hasil Pengujian Pengukuran Daya Reaktif (Q)

No	Power Meter	Monitoring SCADA (kVAR)	$P = V.I.\cos\theta$ (kVAR)	Nilai Error (%)
1	Mitsubishi ME96SS	64.4	64.4	0
2	Schneider PM750	124	124.3	0.2

Tabel 4 memaparkan sekumpulan data yang terdiri dari nilai kesalahan (*error*) rata-rata hasil pemantauan SCADA berdasarkan perhitungan matematis daya reaktif. Dalam konteks ini, dengan merujuk pada gambar grafik yang disajikan, terlihat dengan jelas adanya perbandingan antara pembacaan daya reaktif pada SCADA dan hasil perhitungan matematis yang dilakukan.



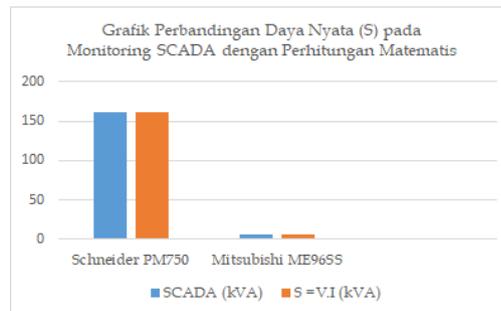
Gambar 9. Grafik Perbandingan Daya Reaktif pada SCADA dengan Perhitungan Matematis

Gambar 9 menampilkan grafik perbandingan daya reaktif yang terpantau pada sistem SCADA dengan hasil perhitungan matematis dari masing-masing *power meter*. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh data bahwa terdapat kesalahan (*error*) pada nilai daya reaktif tersebut. Adapun, nilai kesalahan (*error*) yang didapatkan untuk *power meter PM750* adalah sebesar 0.2%, sedangkan untuk *power meter Mitsubishi ME96SS* tidak terdapat kesalahan (*error*) yang terdeteksi.

Tabel 5 Hasil Pengujian Pengukuran Daya Nyata (S)

No	Power Meter	Monitoring SCADA (kVA)	$P = V.I.\cos\theta$ (kVA)	Nilai Error (%)
1	Mitsubishi ME96SS	6.8	6.8	0
2	Schneider PM750	161	161.5	0.3

Tabel 5 memaparkan sekumpulan data yang terdiri dari nilai kesalahan (*error*) rata-rata hasil pemantauan SCADA berdasarkan perhitungan matematis daya nyata. Dalam konteks ini, dengan merujuk pada gambar grafik yang disajikan, terlihat dengan jelas adanya perbandingan antara pembacaan daya reaktif pada SCADA dan hasil perhitungan matematis yang dilakukan.



Gambar 10. Grafik Perbandingan Daya Reaktif pada SCADA dengan Perhitungan Matematis

Gambar 10 menampilkan grafik perbandingan daya nyata yang terpantau pada sistem SCADA dengan hasil perhitungan matematis dari masing-masing *power meter*. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh data bahwa terdapat kesalahan (*error*) pada nilai daya reaktif tersebut. Adapun, nilai kesalahan (*error*) yang didapatkan untuk *power meter PM750* adalah sebesar 0.3%, sedangkan untuk *power meter Mitsubishi ME96SS* tidak terdapat kesalahan (*error*) yang terdeteksi.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dihasilkan dari penelitian ini mencakup desain dan implementasi sebuah sistem yang terdiri dari beberapa komponen penting, yakni *power meter*, komunikasi data, SCADA, dan perangkat lunak untuk analisis data. Proses implementasi dilakukan melalui tahapan menginstal dan mengkonfigurasi setiap komponen dengan seksama. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan dengan membandingkan pembacaan tegangan, arus, frekuensi, dan daya nyata serta parameter lainnya, sistem ini terbukti memiliki tingkat kesalahan atau *error* yang rendah, sehingga sistem ini sangat efektif untuk melakukan monitoring dan memperoleh efisiensi energi listrik. Di samping itu, perbandingan antara pembacaan parameter daya aktif, daya reaktif, dan daya semu antara SCADA dengan perhitungan matematis juga menunjukkan tingkat *error* yang sangat rendah. Dalam konteks ini, keberadaan sistem ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan bagi industri dalam memperoleh peluang efisiensi energi listrik serta menjadi acuan bagi pengembangan sistem monitoring dan efisiensi energi di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulsalam, Khadeejah A., John Adebisi, Michael Emezirinwune, and Olubayo Babatunde. 2023. "An Overview and Multicriteria Analysis of Communication Technologies for Smart Grid Applications." *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* 3(January): 100121. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100121>.
- Badruzzaman, Yusnan. 2020. "Real Time Monitoring Data Besaran Listrik Gedung Laboratorium Teknik Sipil Politeknik Negeri Semarang." *Jurnal Jtet* 1(2): 50–59.
- Batouta, Kawtar Ibn, Sarah Aouhassi, and Khalifa Mansouri. 2023. "Energy Efficiency in the Manufacturing Industry — A Tertiary Review and a Conceptual Knowledge-Based Framework." *Energy Reports* 9: 4635–54. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.03.107>.
- Boylestad, Robert L, L Robert, and L Boylestad. 2003. *INTRODUCTORY CIRCUIT ANALYSIS Library of Congress Cataloging-in-Publication Data*.

- Fatras, Nicolas, Zheng Ma, Hongbo Duan, and Bo Nørregaard Jørgensen. 2022. "A Systematic Review of Electricity Market Liberalisation and Its Alignment with Industrial Consumer Participation: A Comparison between the Nordics and China." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 167(June). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112793>.
- Herandy, Galla, and Bambang Suprianto. 2019. "Monitoring Biaya Dan Pengukuran Konsumsi Daya Listrik Berbasis Arduino Mega2560 Menggunakan Web." *Jurnal Teknik Elektro* 8(3): 695–702.
- Hudan, Ivan Safril, Rijianto Tri. 2019. "Rancang Bangun Sistem Monitoring Daya Listrik Pada Kamar Kos Berbasis Internet of Things (Iot)." *Jurnal Teknik ELEKTRO* 08(01): 91–99.
- Imam Sya'roni, Anton Hartanto, Nizar Rizki Rahman, Irfan Subiantoro. 2023. "Microcontroller Base Spin Coating Design and IoT Data Monitoring and Storage." *Indonesian Physical Review* 6(1): 114–23. <https://doi.org/10.29303/ip%0Ar.v6i1.194.%0D>.
- Jasim, Ali M. et al. 2023. "A New Optimized Demand Management System for Smart Grid-Based Residential Buildings Adopting Renewable and Storage Energies." *Energy Reports* 9: 4018–35. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.03.038>.
- Kumar, L. Ashok et al. 2021. "Design, Power Quality Analysis, and Implementation of Smart Energy Meter Using Internet of Things." *Computers and Electrical Engineering* 93(May): 107203. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107203>.
- Liang, Ruobing, Yifan Guo, Liang Zhao, and Yan Gao. 2021. "Real-Time Monitoring Implementation of PV/T Façade System Based on IoT." *Journal of Building Engineering* 41(2). <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102451>.
- Oyelami, Seun et al. 2021. "Development of a Low-Cost Wireless Data Logging Pyrano-Meter with Inbuilt Temperature and Humidity Monitoring System." *Environmental Challenges* 5(May): 100219. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100219>.
- Rahayu, Cindy Febriantika. 2020. "Rancang Bangun Sistem Monitoring Daya Listrik Berbasis Internet Of Things Menggunakan Arduino Uno." *Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau*: 1–93.
- Rezaeimozafar, Mostafa, Rory F.D. Monaghan, Enda Barrett, and Maeve Duffy. 2022. "A Review of Behind-the-Meter Energy Storage Systems in Smart Grids." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 164(January): 112573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112573>.
- Rohmingtluanga, C., Subir Datta, Nidul Sinha, and Taha Selim Ustun. 2023. "SCADA Based Intake Monitoring for Improving Energy Management Plan: Case Study." *Energy Reports* 9: 402–10. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.037>.
- Sossenheimer, Johannes et al. 2021. "Hybrid Virtual Metering Points-a Low-Cost, near Real-Time Energy and Resource Flow Monitoring Approach for Production Machines without PLC Data Connection." *Procedia CIRP* 98: 452–57. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.133>.
- Teng, Jonathan, Julius Sentosa Setiadji, and Resmana Lim. 2018. "SISTEM PEMBACAAN DATA POWER METER DENGAN KOMUNIKASI MODBUS SECARA TERPUSAT." *Jurnal Nasional Teknik ElektroTeknik Elektro, Universitas Kristen Petra* 7 No.2: 1–6.
- Widodo, Sapto. 2013. "DASAR DAN PENGUKURAN LISTRIK." : 1–296.