

IMPLEMENTASI SCADA PADA SISTEM MONITORING MIKROGRID MENGUNAKAN PROTOKOL MODBUS

Alfin Sahrin^{1*}, Erna Utami¹, Ali Musyafa²

¹Teknik Instrumentasi Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Cepu, Blora, 58315

²Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Sukolilo, Surabaya, 60111

*E-mail: alfin.sahrin@esdm.go.id

ABSTRAK

Mikrogrid merupakan sistem kelistrikan skala kecil yang memanfaatkan sumber energi baru dan terbarukan, khususnya pada daerah yang belum terjangkau oleh jaringan listrik utama. Salah satu komponen penting dalam pemantauan mikrogrid adalah sistem *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) yang umumnya terdiri atas *Master Terminal Unit* (MTU) yang mengendalikan satu atau lebih *Remote Terminal Unit* (RTU) secara otomatis. Data yang diperoleh pada MTU kemudian divisualisasikan melalui *Human-Machine Interface* (HMI). Penelitian ini memaparkan rancangan sistem pemantauan mikrogrid dengan menggunakan protokol Modbus sebagai representasi sistem SCADA. Prototipe MTU yang diusulkan dirancang untuk memantau dan mengukur tegangan, arus, daya, frekuensi, dan faktor daya yang diukur pada RTU. Sistem ini terdiri atas *smart meter*, unit komunikasi serial, dan perangkat lunak SCADA. Akuisisi data dari *smart meter* pada RTU dilakukan melalui jalur komunikasi yang dikonfigurasi dengan perangkat lunak protokol Modbus. Hasil pengujian menunjukkan bahwa komunikasi langsung antara RTU dan MTU melalui kabel RS485 berhasil diimplementasikan, sehingga pemantauan sistem mikrogrid dapat dilakukan secara efektif. Sistem ini mampu menampilkan data secara *real-time* dengan latensi rata-rata 210 ms, tingkat keberhasilan respon MTU terhadap RTU sebesar 98,5%, dan *error rate* hanya 1,5%. Hal ini menunjukkan keefektifan pemanfaatan SCADA dalam monitoring mikrogrid.

Kata kunci: SCADA, Monitoring, Mikrogrid, Modbus

1. PENDAHULUAN

Sistem pemantauan adalah bagian integral dari manajemen energi dalam suatu mikrogrid, yang meliputi pemantauan generator terdistribusi (*distributed generators*), penyimpanan energi (*energy storage*), dan beban (*loads*) secara *real-time*. Baik dalam mode operasi *grid-connected*, *islanded*, maupun saat terjadi perpindahan mode, sistem ini berfungsi secara optimal untuk mengendalikan elemen-elemen tersebut. Dengan demikian, stabilitas dan keamanan operasi sistem mikrogrid dapat terjamin [1].

Naskah Salah satu pendekatan yang banyak digunakan dalam manajemen energi mikrogrid adalah sistem *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), yang terdiri atas perangkat keras (*hardware*)—untuk komunikasi, kontrol, dan akuisisi data—serta perangkat lunak (*software*) yang menangani visualisasi, penyimpanan data, dan sistem alarm [2]. Komponen utama SCADA mencakup *Remote Terminal Unit* (RTU) sebagai perangkat lapangan untuk pengumpulan data, sistem komunikasi untuk penghubung antar perangkat, *Master Terminal Unit* (MTU) yang mengendalikan operasi mikrogrid, serta *Human-Machine Interface* (HMI) sebagai antarmuka pemantauan dan kontrol [3][4].

Modbus adalah protokol komunikasi serial yang dikembangkan sejak tahun 1979 dan telah menjadi standar *de-facto* dalam industri. Protokol ini memungkinkan komunikasi dua arah antara perangkat, dengan konsep *Modbus Master* yang meminta informasi dan *Modbus Slave*

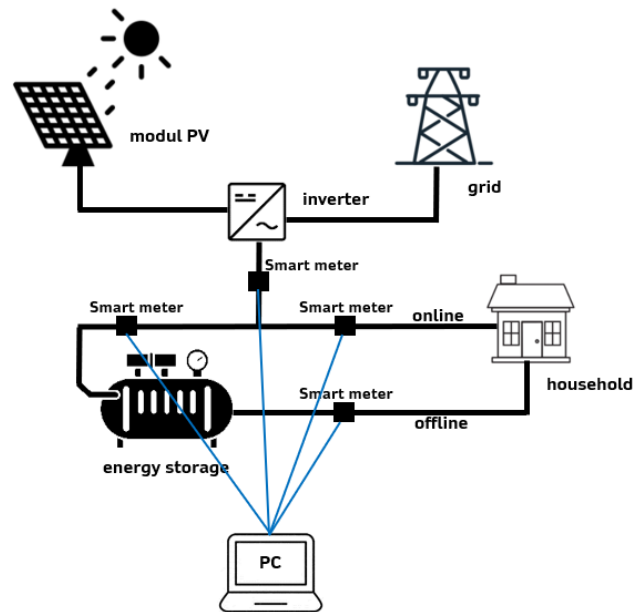
yang menyediakannya. *Modbus* bekerja dengan hingga 247 alamat *slave* dan memungkinkan *master* menulis ke *slave*, serta bersifat protokol terbuka tanpa royalti [5]. *Modbus* adalah metode yang digunakan untuk mengirim data atau informasi melalui koneksi serial antar perangkat elektronik. Perangkat yang meminta informasi disebut *Modbus Master*, sedangkan perangkat yang menyediakan informasi disebut *Modbus Slave*. Dalam standar jaringan *Modbus*, terdapat satu *master* dan hingga 247 *slave*, masing-masing memiliki alamat *slave* berbeda dari 1 hingga 247. *Master* juga dapat menuliskan informasi ke *slave*. *Modbus* merupakan protokol terbuka (*open protocol*) yang dapat digunakan pada berbagai perangkat tanpa memerlukan pembayaran royalti. Protokol ini menjadi standar komunikasi industri yang paling banyak digunakan untuk menghubungkan perangkat elektronik industri. *Modbus* memungkinkan komunikasi dua arah antar perangkat yang terhubung dalam jaringan yang sama. Sebagai contoh, suatu sistem dapat mengukur parameter seperti tegangan, arus, dan frekuensi, kemudian mengirimkan data tersebut ke HMI untuk ditampilkan. *Modbus* juga sering digunakan untuk menghubungkan komputer pengawas (*supervisory computer*) dengan RTU pada sistem SCADA [6].

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring mikrogrid berbasis SCADA dengan memanfaatkan protokol komunikasi *Modbus* sebagai media pertukaran data antara RTU dan MTU. Sistem yang dikembangkan dirancang untuk memantau parameter kelistrikan meliputi tegangan, arus, frekuensi, daya, dan faktor daya pada berbagai komponen mikrogrid, termasuk modul PV, *inverter*, penyimpanan energi, serta beban *daring* dan *luring*. Implementasi dilakukan menggunakan *smart meter* sebagai perangkat pengukuran di sisi RTU yang terintegrasi melalui komunikasi serial RS-485 dengan platform SCADA pada MTU, sehingga data dapat divisualisasikan secara *real-time* melalui HMI. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan sistem monitoring mikrogrid yang andal, terukur, dan sesuai standar industri, serta dapat menjadi referensi penerapan protokol *Modbus* dalam sistem SCADA untuk aplikasi energi terdistribusi.

2. METODE

Gambar 1 memperlihatkan skematik keseluruhan sistem mikrogrid yang digunakan dalam penelitian ini. Sistem ini terdiri atas modul fotovoltaik (*PV modules*) yang terhubung ke jaringan listrik (*grid*) melalui sebuah *inverter*. Energi listrik dari *inverter* didistribusikan ke dua jalur utama, yaitu beban rumah tangga (*household loads*) dan unit penyimpanan energi (*energy storage*). Beban rumah tangga dirancang dapat beroperasi dalam dua mode, yaitu mode *daring* (*online mode*) dan mode *luring* (*offline mode*). Pada mode *daring*, beban memperoleh suplai energi secara langsung dari jaringan listrik dan modul PV, sehingga mendukung konsumsi energi berbasis kombinasi sumber terbarukan dan jaringan. Sementara itu, pada mode *luring*, beban rumah tangga memperoleh suplai energi sepenuhnya dari unit penyimpanan energi, sehingga memungkinkan sistem tetap beroperasi meskipun terjadi pemutusan hubungan dengan jaringan utama.

Untuk memastikan kinerja sistem dapat dipantau secara *real-time*, digunakan lima unit *smart meter* yang masing-masing dipasang pada titik strategis untuk mengukur dan memantau kinerja modul PV, *inverter*, unit penyimpanan energi, beban *daring*, dan beban *luring*. Setiap *smart meter* mampu mengukur parameter kelistrikan utama seperti tegangan, arus, frekuensi, dan daya pada setiap jalur distribusi. Perangkat ini merupakan sistem terintegrasi yang memadukan fungsi sensor dan transduser dalam satu kesatuan, atau dikategorikan sebagai *Integrated Device Environment* (IDE), sehingga mampu melakukan akuisisi data dengan akurasi tinggi.



Gambar 1. Skematik Sistem Monitoring Mikrogrid

Data hasil pengukuran dari seluruh *smart meter* dikirimkan secara berkala ke RTU melalui jalur komunikasi serial RS-485 dengan menggunakan protokol Modbus. RTU kemudian meneruskan data tersebut ke MTU pada platform SCADA untuk diolah, disimpan, dan divisualisasikan melalui HMI dalam bentuk *dashboard* interaktif yang menampilkan data analog dan grafik tren parameter kelistrikan. Dengan arsitektur ini, operator dapat memantau kondisi sistem mikrogrid secara menyeluruh, mendeteksi gangguan sejak dini, dan melakukan pengendalian operasi guna menjaga kestabilan serta efisiensi sistem.

Hal yang perlu diperhatikan dalam melakukan pengukuran dan pemantauan secara *real-time* menggunakan SCADA adalah pemilihan komponen *field device* yang tepat serta protokol komunikasi yang digunakan. Pemilihan *field device* harus mempertimbangkan akurasi pengukuran, keandalan operasi, dan kompatibilitas dengan sistem komunikasi. Demikian pula, protokol komunikasi perlu dipilih berdasarkan stabilitas, kecepatan transmisi, keamanan, serta kompatibilitas dengan perangkat di lapangan.

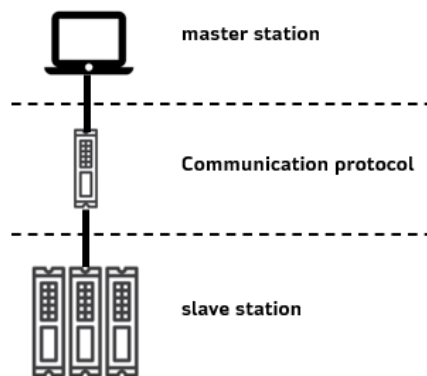
Setelah proses pengukuran dan pemantauan dinyatakan berhasil, langkah pengembangan selanjutnya adalah melakukan perekaman data (*data logging*) secara sistematis dan menerapkan fungsi kendali (*control*) pada sistem. Perekaman data memungkinkan analisis performa dan riwayat operasi mikrogrid, sedangkan fungsi kendali memberikan kemampuan untuk mengatur atau mengoptimalkan kinerja sistem secara otomatis berdasarkan data yang diperoleh.

A. SCADA

Sistem SCADA yang digunakan untuk melakukan pemantauan dibagi menjadi tiga subbagian, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

1. Stasiun induk (*Master Station*)

Stasiun induk merupakan sistem komputer pengawas yang berperan sebagai pusat kendali (*command center*) dari sistem SCADA. Stasiun ini dilengkapi dengan antarmuka (*interface*) dan dapat diprogram untuk mengatur sistem secara otomatis berdasarkan data yang diperoleh dari berbagai sensor. Antarmuka tersebut sering digunakan untuk menjalankan fungsi-fungsi seperti pengumpulan data (*data collection*) dan pengiriman perintah (*command transmission*) ke perangkat di lapangan [7].



Gambar 2. Sistem SCADA

2. Stasiun Slave (*Slave Station*)

Stasiun *slave* merupakan unit yang bertugas mengumpulkan seluruh data yang relevan, serta menerima dan memahami informasi yang dikirimkan oleh stasiun induk. Informasi yang diterima oleh unit ini kemudian diteruskan ke MTU untuk diproses lebih lanjut [8]. Dua jenis unit *slave* yang paling umum digunakan dalam sistem SCADA adalah RTU dan IDE. RTU umumnya berfungsi sebagai perangkat lapangan yang mengakuisisi data dari sensor dan transduser, sedangkan IDE mengintegrasikan berbagai fungsi pengukuran, pengendalian, dan pemrosesan data dalam satu perangkat terpusat.

3. Protokol Komunikasi (*Communication Protocol*)

Protokol komunikasi dapat diartikan sebagai seperangkat bahasa atau aturan yang digunakan dalam suatu sistem agar komponen-komponen di dalamnya dapat saling berkomunikasi. Dalam sistem otomasi industri, terdapat berbagai macam protokol komunikasi yang digunakan, masing-masing memiliki karakteristik, keunggulan, dan kelemahan tersendiri. Pemilihan protokol komunikasi yang tepat menjadi faktor penting untuk memastikan keandalan, kecepatan, keamanan, dan kompatibilitas dalam pertukaran data antarperangkat pada sistem tersebut [9].

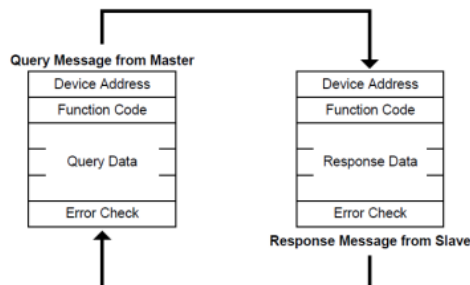
B. Modbus Protocol

Perangkat *Modbus* berkomunikasi menggunakan teknik *master-slave*, di mana hanya satu perangkat (*master*) yang dapat memberikan perintah atau permintaan (*query*). Perangkat *slave* merespons dengan menyediakan data yang diminta oleh *master*. *Master* dapat mengirim permintaan ke satu *slave* tertentu atau mengirim pesan siaran (*broadcast*) ke seluruh *slave*. *Slave* hanya akan memberikan respons terhadap pertanyaan yang ditujukan secara langsung kepadanya. Sementara itu, permintaan *broadcast* dari *master* tidak akan diberikan respons oleh *slave* [10].

Protokol *Modbus* memiliki format khusus untuk setiap *query* yang dikirim oleh *master*, yang berisi alamat *slave* tujuan, kode fungsi (*function code*), data permintaan (*query data*), dan pemeriksaan kesalahan (*error check*). Demikian pula, perangkat *slave* memiliki format tertentu dalam protokol *Modbus* untuk mengirimkan respons, yang terdiri atas kode fungsi, data respons (*response data*), dan pemeriksaan kesalahan. Proses *query-response* pada protokol *Modbus* memiliki format sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.

Query data adalah blok informasi data yang dikirimkan oleh *master* kepada *slave*. *Error check* merupakan proses pemeriksaan kesalahan yang berfungsi untuk memastikan integritas data dan mendeteksi adanya kesalahan akibat mis-komunikasi selama proses transmisi.

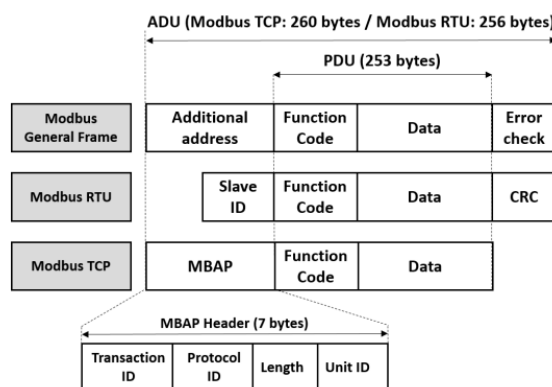
Respons *slave* pada protokol *Modbus* memiliki format yang sama dengan *query*, yaitu mencakup kode fungsi (*function code*), data respons, dan pemeriksaan kesalahan (*error check*). *Function code* pada respons digunakan untuk memberikan konfirmasi terhadap tindakan yang diminta oleh *master*, sedangkan data respons berisi informasi yang dikirim kembali kepada pengirim sesuai dengan permintaan yang telah dilakukan.



Gambar 3. Format Komunikasi Modbus

Sistem komunikasi pada jaringan standar *Modbus* memiliki dua mode transmisi, yaitu *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) dan RTU. Pada setiap jaringan *Modbus*, mode transmisi yang digunakan harus sama untuk semua perangkat yang terhubung. Pada mode ASCII, setiap byte 8-bit dalam pesan dikirimkan sebagai dua karakter ASCII. Sedangkan pada mode RTU, setiap byte 8-bit dalam pesan terdiri atas dua karakter heksadesimal 4-bit. Mode RTU, yang memiliki kepadatan data lebih tinggi, umumnya memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan mode ASCII pada laju baud (*baud rate*) yang sama. Algoritma yang digunakan untuk pemeriksaan kesalahan (*error checking*) bergantung pada metode transmisi yang digunakan, yaitu *Longitudinal Redundancy Check* (LRC) pada mode ASCII dan *Cyclic Redundancy Check* (CRC) pada mode RTU [11].

Penelitian ini menggunakan *Modbus* RTU dalam pemantauan sistem mikrogrid. *Modbus* RTU digunakan pada komunikasi serial dan memanfaatkan representasi nilai data biner terkompresi sebagai protokol komunikasi. Format RTU mengikuti perintah permintaan transfer data (command request data transfer), dengan CRC sebagai mekanisme pemeriksaan kesalahan (*error-check*) untuk memastikan keandalan data yang dikirim. Bentuk format frame pada *Modbus* RTU ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kerangka Modbus

C. Human Machine Interface (HMI)

HMI merupakan perangkat lunak antarmuka dalam bentuk *Graphical User Interface* berbasis komputer yang menjadi penghubung antara operator dengan mesin atau peralatan yang dikendalikan, serta beroperasi pada tingkat pengawasan (*supervisory level*). Secara umum, HMI memiliki beberapa fungsi utama, yaitu pemantauan (*monitoring*), tindakan (*action*), pencatatan dan penyimpanan data (*data logging & storage*), riwayat alarm (*alarm history*), dan penyajian tren data (*trending*).

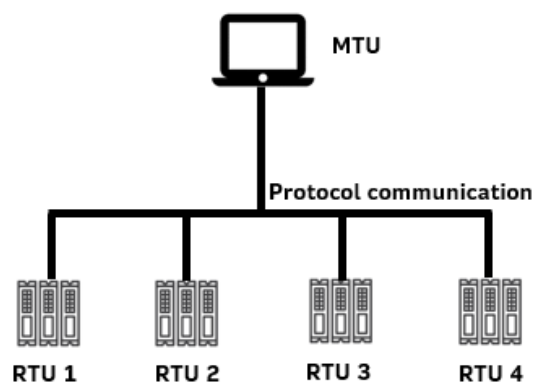
Perangkat lunak HMI dapat memanfaatkan platform *open source* maupun perangkat lunak komersial. Pada penelitian ini, digunakan perangkat lunak HMI kelas industri yang memiliki fleksibilitas tinggi untuk pemantauan, pengendalian, dan manajemen energi. Dengan HMI, insinyur dan peneliti dapat berinteraksi secara *real-time* untuk menganalisis data, memperoleh informasi, dan menampilkan hasil secara visual, sehingga mendukung proses pengambilan keputusan yang cepat dan akurat.

D. Desain Monitoring

Dalam perancangan sistem pemantauan untuk mikrogrid, peralatan yang digunakan terdiri atas empat RTU, kabel komunikasi, dan MTU. Keempat RTU tersebut masing-masing berada pada level *Alternating Current (AC)* dan dapat dihubungkan ke MTU melalui jalur komunikasi. RTU yang digunakan berupa *smart meter* dengan tipe khusus untuk sistem AC, yang berfungsi memantau keluaran *inverter*, penyimpanan energi (*energy storage*), serta beban daring (*online loads*) dan beban luring (*offline loads*).

Protokol komunikasi yang digunakan adalah *Modbus RTU*, atau dikenal juga sebagai komunikasi RS485. *Modbus RTU* merupakan jenis komunikasi serial yang banyak diaplikasikan dalam sistem pemantauan data. Protokol ini digunakan untuk menghubungkan RTU dengan MTU. RTU akan membaca data dari sensor, kemudian mengirimkannya ke MTU sesuai permintaan yang diajukan oleh MTU.

MTU berupa seperangkat komputer pribadi (*personal computer*) yang dilengkapi perangkat lunak untuk menampilkan data dalam bentuk visual. Tampilan visual dapat dirancang sesuai kebutuhan, termasuk penyajian data dalam bentuk grafik. Desain visualisasi dan grafik dapat dibuat langsung menggunakan perangkat lunak bawaan maupun dikembangkan menggunakan perangkat lunak eksternal. Hasil desain visual kemudian dihubungkan dan disesuaikan dengan port komunikasi yang digunakan. Rancangan sistem pemantauan ini ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Desain Sistem Monitoring

D. Implementasi dan Pengujian Keefektifan SCADA

Implementasi pemantauan mikrogrid dilakukan melalui integrasi empat *smart meter* sebagai RTU yang mengukur parameter kelistrikan, dihubungkan dengan MTU menggunakan protokol Modbus RTU. Sistem diuji dengan metode simulasi beban, pengukuran respons waktu (*response time*), dan tingkat keberhasilan komunikasi data. Pengujian efektifitas mencakup:

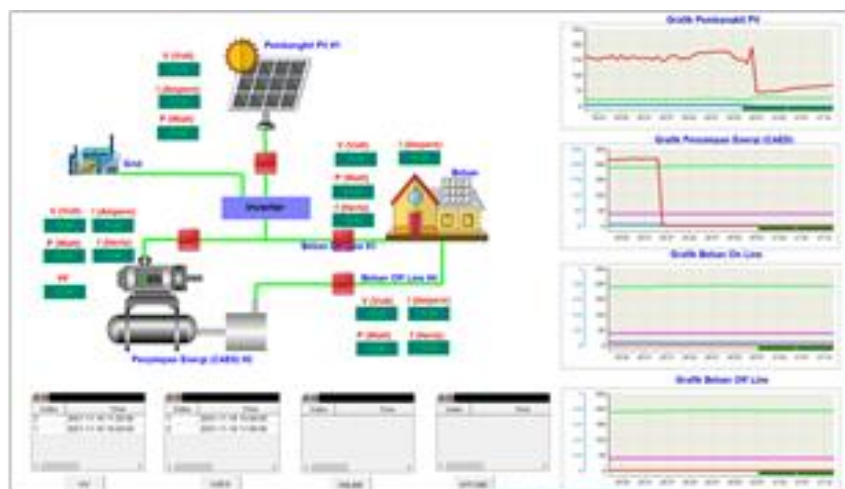
- Real-time Performance*: Diukur menggunakan stopwatch digital dan pencatatan timestamp antar pengiriman dan penerimaan data.
- Tingkat Respon: Jumlah permintaan data dari MTU yang mendapat balasan dari RTU.
- Tingkat *Error*: Jumlah komunikasi gagal atau data *corrupt* yang tidak dapat diterjemahkan oleh HMI.

Kriteria keefektifan SCADA pada penelitian ini adalah:

- Waktu respon data ≤ 500 ms.
- Tingkat keberhasilan respon $\geq 95\%$.
- Error rate* $\leq 5\%$.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Visualisasi dan grafik pada MTU dibuat menggunakan perangkat lunak seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Pemantauan difokuskan pada parameter hasil pengukuran sensor pada jalur masing-masing komponen sistem. Parameter pengukuran yang ditampilkan meliputi tegangan, arus, frekuensi, daya, dan faktor daya. Seluruh parameter pengukuran tersebut ditampilkan dalam bentuk angka (*numeric display*) pada layar, sekaligus divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk memudahkan analisis tren dan perubahan nilai secara *real-time*.



Gambar 6. Layar MTU

Berdasarkan Gambar 6, sistem pemantauan dapat ditampilkan sesuai dengan yang diharapkan. Gambar 7 menunjukkan data yang dihasilkan dari proses pemantauan yang dilakukan pada RTU. Garis berwarna merah merepresentasikan daya (*power*), warna biru menunjukkan arus (*current*), dan warna hijau menunjukkan tegangan (*voltage*). Berdasarkan grafik yang dihasilkan, dapat dianalisis bahwa daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit PV bergantung pada daya yang digunakan untuk beban. Oleh karena itu, grafik daya berfluktuasi sesuai dengan perubahan daya beban. Arus akan muncul ketika beban dalam kondisi digunakan

(load on), sedangkan tegangan cenderung konstan. Nilai daya yang dihasilkan merupakan hasil perkalian antara arus dan tegangan.



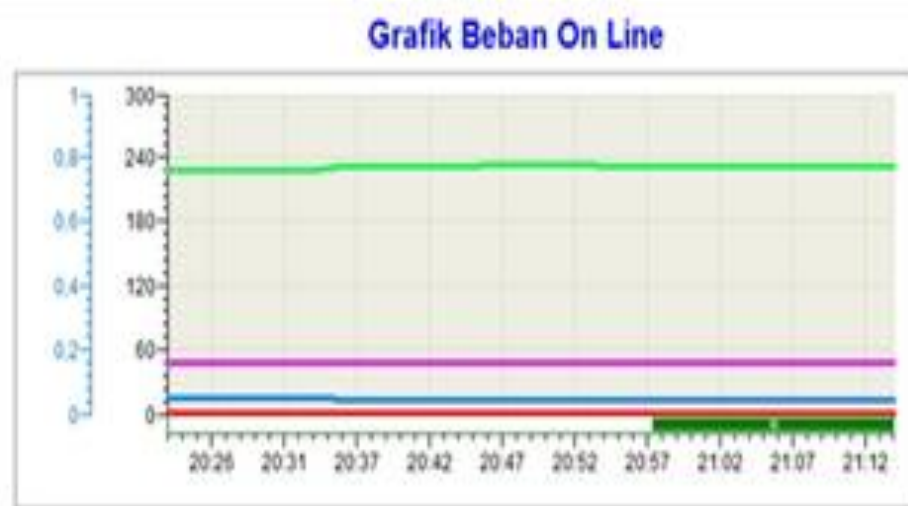
Gambar 7. Grafik Keluaran Inverter

Gambar 8 menunjukkan data yang dihasilkan dari hasil pemantauan. Garis berwarna merah merepresentasikan daya (*power*), warna biru menunjukkan arus (*current*), warna ungu menunjukkan frekuensi (*frequency*), dan warna hijau menunjukkan tegangan (*voltage*). Pada proses pengisian (*charging*), kestabilan daya akan tercapai apabila tidak terjadi perubahan beban maupun kondisi operasi. Ketika terjadi transisi dari kondisi batas bawah (*lower limit condition*) menuju proses pengisian, terdeteksi lonjakan signifikan (*spike*) yang berlangsung sekitar 1 detik sebelum sistem mencapai kondisi tunak (*steady state*). Durasi keseluruhan proses pengisian, mulai dari awal hingga penuh, memerlukan waktu sekitar 40 menit.



Gambar 8. Grafik Penyimpanan Energi

Gambar 9. menunjukkan data yang dihasilkan dari hasil pemantauan. Garis berwarna merah merepresentasikan daya (*power*), warna biru menunjukkan arus (*current*), warna ungu menunjukkan frekuensi (*frequency*), dan warna hijau menunjukkan tegangan (*voltage*). Ketika beban belum dinyalakan, baik tegangan maupun arus berada pada posisi nol. Namun, setelah beban diaktifkan, arus dan tegangan menunjukkan perubahan. Tegangan berada pada kisaran 220 volt, frekuensi pada 50 Hz, dan arus berada pada tingkat sekitar 0,1 ampere.



Gambar 9. Grafik Beban *Online*

Gambar 10. menunjukkan data yang dihasilkan dari hasil pemantauan. Garis berwarna merah merepresentasikan daya (*power*), warna biru menunjukkan arus (*current*), warna ungu menunjukkan frekuensi (*frequency*), dan warna hijau menunjukkan tegangan (*voltage*). Ketika beban belum dinyalakan, baik tegangan maupun arus berada pada posisi nol. Namun, setelah beban diaktifkan, arus dan tegangan menunjukkan perubahan yang signifikan. Tegangan berada pada kisaran 220 volt, frekuensi pada 50 Hz, dan arus berada pada tingkat sekitar 0,1 ampere.



Gambar 10. Grafik Beban *Offline*

Berdasarkan hasil pengujian selama 6 jam operasi sistem, rata-rata waktu respon dari MTU ke RTU adalah 210 milidetik, memenuhi kriteria *real time*, tingkat keberhasilan komunikasi adalah 98,5% dari 2000 permintaan data, tingkat *error* atau data tidak terbalas hanya 1,5%, umumnya terjadi saat switching mode beban dari *online* ke *offline*. Hasil ini menunjukkan sistem SCADA yang digunakan telah memenuhi kriteria keefektifan yang ditentukan. Jika dibandingkan dengan pendekatan lain seperti sistem berbasis MQTT pada penelitian [7], sistem berbasis Modbus RTU menunjukkan kecepatan dan stabilitas lebih tinggi dalam jaringan lokal tertutup tanpa koneksi internet. Penelitian ini juga menunjukkan kelebihan dari sistem SCADA

Modbus dalam aspek keandalan, dibanding sistem berbasis web-SCADA yang memiliki rata-rata latensi >500 ms dalam [12].

4. SIMPULAN

Pemantauan sistem mikrogrid dengan SCADA dan protokol komunikasi *Modbus* RTU dapat diimplementasikan dengan baik dan memberikan solusi pemantauan yang andal dengan biaya relatif rendah. Tampilan hasil pengukuran dapat dikustomisasi dalam berbagai format, seperti analog, digital, batang (*bar chart*), maupun grafik tren, sehingga memudahkan analisis kondisi sistem secara real-time. Pengembangan lebih lanjut dapat diarahkan pada integrasi sistem kendali (*control system*) untuk mengatur operasi mikrogrid secara otomatis. Implementasi sistem kendali ini perlu disertai dengan analisis desain yang mempertimbangkan kapasitas pembangkit listrik, inverter, penyimpanan energi, serta kebutuhan beban. Selain itu, pengembangan ke depan juga dapat mencakup integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) untuk pemantauan jarak jauh, penerapan machine learning untuk prediksi beban dan optimasi operasi, serta peningkatan aspek keamanan siber guna melindungi sistem dari potensi serangan atau gangguan. Dengan langkah-langkah tersebut, sistem pemantauan mikrogrid tidak hanya berfungsi sebagai alat observasi, tetapi juga mampu menjadi sistem pengendalian yang adaptif, efisien, dan siap mendukung pengelolaan energi terdistribusi di masa depan. Implementasi sistem monitoring SCADA dengan protokol Modbus RTU berhasil memantau parameter kelistrikan secara *real-time* dengan efektivitas tinggi. Sistem menunjukkan kinerja handal dengan latensi rendah, tingkat respons tinggi, dan *error rate* rendah, sehingga layak diterapkan untuk pemantauan mikrogrid skala kecil-menengah.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. Ali *et al.*, “Micro-grid Monitoring and Supervision: Web-based SCADA Approach,” *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 16, no. 5, pp. 2313–2331, 2021, doi: 10.1007/s42835-021-00762-0.
- [2] M. Kermani, D. Luca, S. Rotondo, A. Paolillo, F. Manzo, and L. Martirano, “Centralized Control Strategy Based on SCADA System,” 2020.
- [3] M. M. Utilizing, C. Booth, A. O. Rousis, P. Kalliga, A. Patsidis, and A. Dy, “Analytics Methods,” 2023.
- [4] K. E. Ojo, A. K. Saha, and V. M. Srivastava, “Microgrids’ Control Strategies and Real-Time Monitoring Systems: A Comprehensive Review,” *Energies*, vol. 18, no. 13, pp. 1–34, 2025, doi: 10.3390/en18133576.
- [5] A. J. Cerveli3n Bastidas, G. L. Agredo M3endez, J. Revelo-Fuelag3n, and J. E. Candelo-Becerra, “Performance evaluation of modbus and DNP3 protocols in the communication network of a university campus microgrid,” *Results Eng.*, vol. 24, no. November, p. 103656, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103656.
- [6] M. Kermani, B. Adelmanesh, E. Shirdare, C. A. Sima, D. L. Carn3, 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.
- [7] M. Waqas and M. Jamil, “Smart IoT SCADA System for Hybrid Power Monitoring in Remote Natural Gas Pipeline Control Stations,” *Electron.*, vol. 13, no. 16, 2024, doi: 10.3390/electronics13163235.
- [8] L. O. Aghenta and M. T. Iqbal, “Low-cost, open source IoT-based SCADA system design using thinger.IO and ESP32 thing,” *Electron.*, vol. 8, no. 8, pp. 1–24, 2019, doi: 10.3390/electronics8080822.
- [9] M. O. Qays, I. Ahmad, A. Abu-Siada, M. L. Hossain, and F. Yasmin, “Key communication technologies, applications, protocols and future guides for IoT-assisted smart grid systems: A

- review,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 2440–2452, 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.01.085.
- [10] V. G. Găitan, I. Zagan, and N. C. Găitan, “Modbus RTU Protocol Timing Evaluation for Scattered Holding Register Read and ModbusE-Related Implementation,” *Processes*, vol. 13, no. 2, 2025, doi: 10.3390/pr13020367.
- [11] N. C. Găitan, I. Zagan, and V. G. Găitan, “Proposed Modbus Extension Protocol and Real-Time Communication Timing Requirements for Distributed Embedded Systems,” *Technologies*, vol. 12, no. 10, 2024, doi: 10.3390/technologies12100187.
- [12] M. A. Ali *et al.*, “MICROGRID MONITORING AND SUPERVISION: WEB-BASED SCADA APPROACH,” *IET Conf. Proc.*, vol. 2021, no. 2, pp. 155–160, Jul. 2021, doi: 10.1049/icp.2021.1399.