

RANCANGAN KONSEP SISTEM KONTROL PLTS OFF-GRID BERBASIS SCADA PADA LABORATORIUM TEACHING FACTORY

Febryanti Miserycordia Dareda¹, Firginia Mikhalla Takalamingan², Hevania
Aguilera Sofice Kojongian³, Ventje Ferdy Aror⁴, Julianus Gesuri Daud⁵
^{1,2,3,4,5} Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri
Manado

firginia.takalamingan25@gmail.com¹, miserydrda@gmail.com²,
fkojongianhevania68@gmail.com³, ventjeferdyaror@gmail.com⁴,
julianus1107@gmail.com⁵

ABSTRACT

This study proposes a conceptual design of a SCADA-based (Supervisory Control and Data Acquisition) control system for an off-grid Photovoltaic Power System (PLTS) intended for the teaching factory laboratory of Politeknik Negeri Manado. The system is designed to perform continuous monitoring and centralized control of PLTS operational parameters through four integrated functional layers, namely the sensor layer, the control layer, the communication layer, and the supervisory layer. The proposed architecture integrates an RS-485 power meter type 2121, a current transformer (CT), a Hywell PLC, and an HMI into a single coordinated platform. The PLTS subsystem to be controlled consists of a monocrystalline solar module with 18–22% efficiency, a PWM-based Solar Charge Controller (PWM-SCC), and a lithium-ion battery as the energy storage unit. The control system uses the Modbus RTU protocol over RS-485 to ensure stable communication among components, while the HMI provides a real-time visual interface for the operator. This design emphasizes a modular, educational, and industry-oriented framework structured in accordance with IEC 61724-1 (2017). The proposed laboratory is designed to strengthen students' technical competencies in PLTS installation, SCADA operation, and system maintenance, as well as to support SDGs 4 (Quality Education) and SDGs 7 (Affordable and Clean Energy).

Keywords: PLTS control system, SCADA, PLC, PWM-SCC, off-grid, teaching factory

ABSTRAK

Penelitian ini mengusulkan rancangan konsep sistem kontrol berbasis SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid yang diperuntukkan bagi laboratorium teaching factory Politeknik Negeri Manado. Sistem ini dirancang untuk melakukan pemantauan berkelanjutan sekaligus pengendalian terpusat terhadap parameter operasi PLTS melalui empat lapisan fungsional yang terintegrasi, yaitu lapisan sensor, lapisan kontrol, lapisan komunikasi, dan lapisan supervisi. Arsitektur yang diusulkan memadukan power meter RS-485 tipe 2121, current transformer (CT), PLC Hywell, dan HMI menjadi satu platform terkoordinasi. Subsistem PLTS yang menjadi objek kendali terdiri atas modul monocrystalline berefisiensi 18–22%, Solar Charge Controller berbasis PWM (PWM-SCC), dan baterai lithium-ion sebagai unit penyimpan energi. Sistem kontrol menggunakan protokol Modbus RTU melalui jalur RS-485 untuk menjamin kestabilan komunikasi antarkomponen, sementara HMI menyediakan antarmuka

visual operator secara real-time. Rancangan ini menekankan kerangka modular, edukatif, dan berorientasi industri yang disusun mengacu pada standar IEC 61724-1 (2017). Laboratorium yang diusulkan dirancang untuk memperkuat kompetensi teknis mahasiswa dalam instalasi PLTS, pengoperasian SCADA, dan pemeliharaan sistem, sekaligus mendukung pencapaian SDGs 4 (Quality Education) dan SDGs 7 (Affordable and Clean Energy).

Kata Kunci: sistem kontrol PLTS, SCADA, PLC, PWM-SCC, off-grid, teaching factory

A. Pendahuluan

Energi listrik menjadi penopang utama hampir seluruh aktivitas manusia modern, mulai dari kegiatan pendidikan, operasional industri, hingga kebutuhan rumah tangga sehari-hari. Di tengah meningkatnya kebutuhan tersebut, dominasi energi fosil pada bauran energi global mendorong percepatan transisi menuju sumber energi terbarukan. Indonesia, sebagai negara yang dilewati garis ekuator, memiliki potensi energi surya yang sangat besar dan tersedia hampir sepanjang tahun. Wilayah Manado dan sekitarnya, yang berada di kawasan tropis ekuatorial, menerima intensitas radiasi matahari yang relatif tinggi dan stabil, sehingga sangat potensial untuk dikembangkan menjadi lokasi penerapan PLTS dengan tingkat keluaran daya yang konsisten (Rifai et al., 2014; Rio et al., 2024).

PLTS dengan konfigurasi off-grid merupakan sistem mandiri yang beroperasi tanpa interkoneksi dengan

jaringan PLN, sehingga sangat sesuai diterapkan pada wilayah terpencil maupun fasilitas berskala kecil seperti laboratorium kampus. Namun pada proses operasionalnya saat ini, sistem PLTS off-grid umumnya masih dikelola secara manual atau hanya dilengkapi dengan pemantauan sederhana. Proses pemantauan parameter seperti tegangan, arus, daya keluaran, dan status pengisian baterai sering dilakukan terpisah-pisah dengan alat ukur konvensional, sehingga operator tidak memperoleh gambaran kondisi sistem secara menyeluruh dan real-time. Kondisi ini menyulitkan operator untuk merespons perubahan intensitas radiasi matahari, fluktuasi beban, maupun penurunan kondisi baterai secara cepat, dan berpotensi menurunkan kinerja sistem hingga menyebabkan kegagalan operasi secara keseluruhan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan sebuah sistem kontrol terintegrasi yang dapat

memantau dan mengendalikan seluruh parameter PLTS dari satu titik terpusat. SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) merupakan teknologi yang telah lama digunakan pada manajemen instalasi energi skala industri dan terbukti mampu menggabungkan fungsi akuisisi data, pemantauan, dan pengendalian dalam satu antarmuka yang terstruktur. Bila diterapkan pada PLTS, sistem SCADA dirancang untuk menyediakan visibilitas penuh terhadap seluruh parameter operasi, mulai dari tegangan, arus, daya, hingga status baterai, sehingga operator dapat mengambil keputusan secara cepat dan akurat. Meskipun potensinya jelas, penerapan SCADA pada PLTS skala laboratorium di lingkungan pendidikan vokasi masih sangat terbatas, padahal kehadiran sistem ini sangat dibutuhkan sebagai sarana pembelajaran yang merepresentasikan praktik industri sebenarnya.

Pada lingkup pendidikan vokasi, pembelajaran berbasis praktik terbukti lebih efektif dalam membangun kompetensi teknis dibandingkan pendekatan teori semata. Konsep teaching factory, yang memadukan pembelajaran formal dengan replikasi

suasana industri, dipandang berhasil mempersempit kesenjangan antara lulusan dengan kebutuhan dunia kerja (UNESCO-UNEVOC, 2020). Studi yang dilakukan Rohaeni et al. (2021) menunjukkan bahwa penerapan teaching factory tidak hanya meningkatkan hard skills, tetapi juga memperkuat soft skills pada sekitar 78% pesertanya. Oleh karena itu, perlu dirancang sebuah laboratorium teaching factory PLTS off-grid yang dilengkapi sistem kontrol berbasis SCADA, agar mahasiswa dapat berlatih langsung pada perangkat yang setara dengan praktik industri energi terbarukan yang terus berkembang di Indonesia.

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas PLTS off-grid dari berbagai sudut pandang. Husna dan Santoso (2025) menyusun simulasi konfigurasi optimal menggunakan perangkat HOMER Pro. Senapan et al. (2022) memanfaatkan PVsyst untuk menelaah sistem dan memperoleh nilai performance ratio. Stefanie (2021) merancang pemantauan berbasis IoT untuk analisis kinerja, sedangkan Kodo et al. (2024) merancang PLTS perkebunan berkapasitas 68,2 kWp. Namun, kajian-kajian tersebut sebagian besar

berfokus pada simulasi atau analisis kinerja, dan belum membahas secara komprehensif rancangan arsitektur sistem kontrol terintegrasi, terutama untuk konteks laboratorium pendidikan vokasi di kawasan Sulawesi Utara. Hal inilah yang mendasari perlunya disusun sebuah rancangan konsep sistem kontrol terpadu yang khusus diperuntukkan bagi laboratorium teaching factory.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang sebuah konsep sistem kontrol PLTS off-grid berbasis SCADA yang spesifik untuk laboratorium teaching factory Politeknik Negeri Manado. Rancangan yang diusulkan menekankan tiga aspek utama: pertama, penyusunan arsitektur kontrol SCADA berbasis PLC yang ditujukan khusus untuk PLTS off-grid skala laboratorium vokasi; kedua, perumusan konfigurasi sistem dengan PWM-SCC sebagai pengendali pengisian baterai yang dirancang sederhana namun representatif untuk kebutuhan pembelajaran; serta ketiga, penyusunan kerangka rancangan yang mengacu pada standar IEC 61724-1 (2017) sebagai pedoman teknis. Sistem yang dirancang diharapkan dapat menjadi cetak biru

pengembangan laboratorium teaching factory PLTS yang memadukan fungsi pemantauan, pengendalian, dan pembelajaran dalam satu platform terintegrasi.

B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan perancangan konseptual (conceptual design study) yang ditempuh melalui empat metode utama, yaitu studi literatur (literature study), studi deskriptif (descriptive study), wawancara (interview), dan observasi (observation). Keempat metode tersebut digunakan secara saling melengkapi untuk menghasilkan rancangan konsep sistem kontrol PLTS off-grid berbasis SCADA yang akan diterapkan di Laboratorium Energi Baru Terbarukan (EBT), Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado, yang berlokasi di Jl. Raya Politeknik, Kelurahan Buha, Kecamatan Mapanget, Kota Manado pada koordinat 1,47° LU dan 124,84° BT. Kondisi iklim tropis ekuatorial Manado menjadi acuan dalam menentukan asumsi rancangan, khususnya terkait potensi radiasi matahari dan rentang suhu permukaan panel (Rifai et al., 2014). Total durasi perancangan

dilaksanakan selama lima bulan, mencakup tahap kajian literatur, perancangan arsitektur, pemilihan komponen, perakitan instalasi, hingga penyusunan laporan.

PLTS off-grid yang menjadi objek rancangan disusun oleh empat komponen utama: (1) modul surya monocrystalline dengan efisiensi 18–22%; (2) Solar Charge Controller berbasis Pulse Width Modulation (PWM-SCC) yang berfungsi mengendalikan proses pengisian baterai; (3) baterai lithium-ion sebagai media penyimpan energi; serta (4) panel proteksi DC/AC yang dilengkapi MCB dan SPD. Modul monocrystalline dipilih karena efisiensinya lebih tinggi dibanding tipe polycrystalline (15–18%), terutama menguntungkan ketika ketersediaan area pemasangan terbatas (Putranto, 2021). PWM-SCC dipilih karena karakteristiknya yang sederhana, biaya investasinya terjangkau, serta cocok untuk kebutuhan laboratorium pendidikan vokasi dengan skala daya kecil hingga menengah.

Rancangan sistem kontrol berbasis SCADA disusun menjadi empat lapisan fungsional yang bekerja secara terintegrasi. Pada lapisan sensor (akuisisi), dipasang power

meter RS-485 tipe 2121 yang dipadukan dengan CT untuk membaca tegangan, arus, daya, serta energi secara berkesinambungan. Pada lapisan kontrol (RTU), PLC Hywell berfungsi sebagai Remote Terminal Unit yang menerima data dari sensor, menjalankan logika kontrol, dan menyimpan rekaman parameter secara periodik. Lapisan komunikasi (transmisi) menggunakan protokol serial RS-485 (Modbus RTU) yang dikenal andal dan tahan terhadap noise elektromagnetik. Pada lapisan supervisi (aplikasi), HMI menampilkan parameter secara real-time sekaligus menyediakan kanal intervensi manual bagi operator.

Tabel 1 Daftar Alat Pendukung Perancangan

No	Nama Alat	Jumlah
1	Obeng (+) dan (-)	2 buah
2	Tang kombinasi	1 buah
3	Tang lancip	1 buah
4	Tang potong	1 buah
5	Avometer / Multimeter digital	1 buah
6	Bor listrik	1 buah
7	Gurinda listrik	1 buah

Sumber: Data primer peneliti (2026)

Penyusunan rancangan dilakukan melalui empat metode yang saling melengkapi. Pertama, studi literatur (literature study) dilakukan dengan menelaah jurnal nasional terindeks

SINTA, jurnal internasional bereputasi, serta dokumen standar IEC 61724-1:2017 sebagai rujukan baku indikator kinerja PLTS. Kedua, studi deskriptif (descriptive study) digunakan untuk menggambarkan karakteristik komponen, prinsip kerja SCADA, serta arsitektur empat lapisan yang menjadi kerangka rancangan. Ketiga, wawancara (interview) dilakukan dengan dosen pembimbing dan teknisi laboratorium untuk memperoleh masukan teknis terkait pemilihan komponen dan kelayakan implementasi rancangan. Keempat, observasi (observation) dilakukan terhadap kondisi laboratorium dan instalasi PLTS yang telah ada untuk mengidentifikasi kebutuhan teknis dan tata letak komponen yang sesuai.

Sebagai bagian dari kerangka rancangan, beberapa persamaan utama digunakan untuk mendeskripsikan parameter operasi sistem yang akan dipantau oleh SCADA. Daya keluaran panel dirumuskan sebagai:

$$P = V \times I$$

dengan P sebagai daya (Watt), V tegangan (Volt), dan I arus (Ampere). Final Yield (Yf) yang

merepresentasikan energi keluaran AC harian per kWp dirumuskan melalui:

$$Y_f = \frac{E_{AC}}{P_{rated}}$$

Reference Yield (Yr) diturunkan dari iradiasi aktual dibagi iradiasi pada Standard Test Condition (1000 W/m²):

$$Y_r = \frac{H_t}{G_{STC}}$$

Performance Ratio sebagai indikator mutu operasi dirumuskan sesuai IEC 61724-1 (2017):

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \times 100\%$$

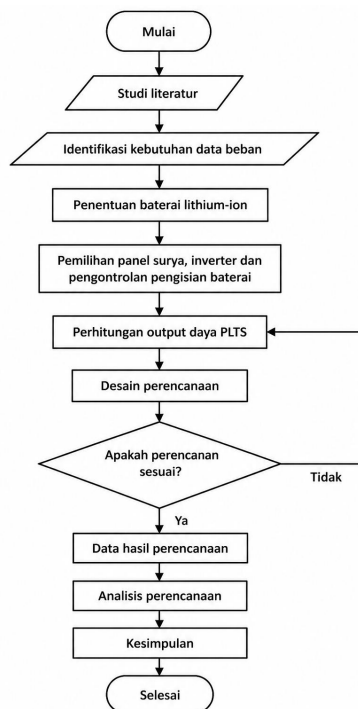
Sedangkan efisiensi sistem komprehensif dapat dihitung dengan membandingkan energi keluaran AC terhadap total energi radiasi yang diterima panel:

$$\eta_{sys} = \frac{E_{AC}}{H_t \times A_{panel}} \times 100\%$$

dengan A_{panel} sebagai luas total permukaan modul surya. Persamaan-persamaan tersebut digunakan sebagai dasar perhitungan rancangan dan diintegrasikan ke dalam logika pemrosesan data pada PLC, sehingga parameter operasi yang ditampilkan

pada HMI dapat dihitung secara langsung dari pembacaan sensor sistem.

Pelaksanaan rancangan ditata dalam tujuh tahap berurutan: (1) studi literatur sebagai landasan teori dan pemilihan komponen; (2) penyusunan desain arsitektur sistem kontrol empat lapisan; (3) pemilihan dan pengadaan komponen sesuai spesifikasi rancangan; (4) tahap perakitan dan instalasi fisik PLTS; (5) integrasi sistem kontrol berbasis SCADA dengan PLC-HMI; (6) pemeriksaan fungsi sistem berdasarkan kerangka rancangan yang disusun; serta (7) penyusunan laporan akhir. Visualisasi alur perancangan dapat dilihat pada Gambar 1.



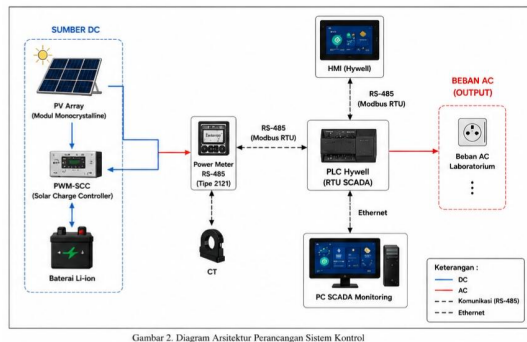
Gambar 1 Flowchart Prosedur Penelitian

C. Hasil Pembahasan

Rancangan Konsep

1) Rancangan Konsep Sistem PLTS Off-Grid

Rancangan konsep PLTS off-grid yang menjadi objek kendali sistem SCADA disusun sebagai sebuah unit pembangkit listrik tenaga surya berskala laboratorium. Sistem ini dirancang untuk mengubah energi matahari menjadi energi listrik AC yang dapat digunakan langsung pada beban laboratorium. Proses dimulai dengan modul surya monocrystalline yang menangkap radiasi matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik DC. Modul surya direncanakan dipasang pada rangka penyangga di area terbuka laboratorium, dengan orientasi mengarah ke utara mengikuti posisi geografis Manado yang berada di Lintang Utara $1,47^\circ$. Sudut kemiringan panel ditetapkan mengikuti nilai lintang lokasi agar penerimaan radiasi matahari berlangsung optimal sepanjang tahun. Diagram arsitektur perancangan sistem kontrol PLTS off-grid yang menjadi rujukan studi ini ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Arsitektur Perancangan Sistem Kontrol

Gambar 2 Diagram Arsitektur Perancangan Sistem Kontrol PLTS Off-Grid

Setiap komponen pada rancangan ini memiliki fungsi spesifik dalam alur kerja sistem. Modul surya monocrystalline berfungsi sebagai pengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik DC. Komponen ini dipilih karena efisiensi konversinya berkisar 18–22%, lebih tinggi dibanding polycrystalline yang hanya 15–18%, sehingga sangat cocok untuk instalasi dengan area pemasangan yang terbatas (Putranto, 2021). Struktur kristal tunggal modul ini dihasilkan melalui proses Czochralski yang meminimalkan keberadaan batas butir (grain boundary), sehingga aliran elektron pada saat foton diserap berlangsung lebih efisien (PIn dan Plts, 2020). Solar Charge Controller berbasis PWM (PWM-SCC) berfungsi untuk mengatur proses pengisian baterai dengan teknik modulasi lebar pulsa, sehingga tegangan pengisian baterai tetap stabil dan terhindar dari

overcharge. Komponen ini dipilih karena karakter kerjanya sederhana, biaya investasinya terjangkau, serta sesuai untuk laboratorium pendidikan dengan skala daya kecil hingga menengah. Baterai lithium-ion berfungsi sebagai media penyimpanan energi yang dihasilkan modul surya. Komponen ini dipilih karena densitas energinya tinggi, masa siklus pengisiannya panjang, dan efisiensi charge/discharge-nya melampaui baterai konvensional (Fadli Rohman, 2012).

2) Arsitektur dan Implementasi Sistem Kontrol Berbasis SCADA

Bagian inti dari rancangan ini adalah arsitektur sistem kontrol SCADA yang dirancang khusus untuk lingkungan laboratorium vokasi. Berbeda dengan sistem monitoring biasa yang hanya merekam data secara pasif, sistem kontrol yang dirancang menempatkan PLC Hywell pada peran aktif. PLC ini berfungsi untuk mengakuisisi data dari sensor, memproses kondisi operasi sistem, dan memiliki kemampuan mengirimkan sinyal intervensi ketika parameter operasi melampaui ambang yang ditetapkan dalam logika

kontrol. Spesifikasi setiap komponen sistem kontrol disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Spesifikasi Komponen Sistem Kontrol SCADA

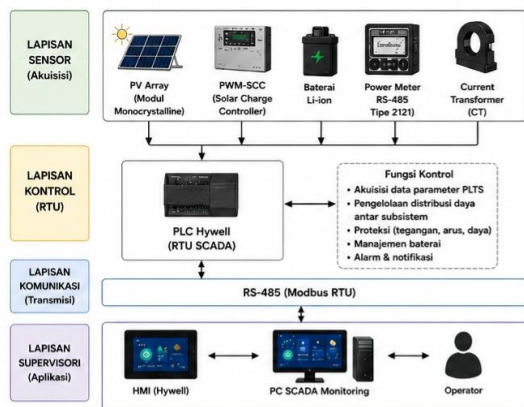
Komponen	Peran	Spesifikasi
Power Meter RS-485	Sensor: V, I, P, energi real-time	RS-485, presisi tinggi
Current Transformer	Pengukuran arus tanpa memutus rangkaian	Rasio sesuai kapasitas
PLC Hywell	RTU: logika kontrol & akuisisi data	I/O digital/analog
HMI	Antarmuka visualisasi operator	& Layar sentuh real-time
PWM-SCC	Solar Charge Controller berbasis PWM	Modulasi lebar pulsa
Baterai Lithium-ion	Penyimpanan energi surya	Densitas energi tinggi

Sumber: Data primer penelitian (2026)

Empat lapisan fungsional menyusun arsitektur kontrol secara terintegrasi, dengan alur kerja yang sistematis dari sensor hingga antarmuka operator. Proses dimulai pada lapisan sensor, di mana power meter RS-485 dan CT berfungsi untuk membaca tegangan panel (VDC), arus panel (IDC), daya keluaran ($P = V \times I$), tegangan baterai, arus pengisian dan pengosongan, tegangan output beban (VAC), serta arus beban aktif secara terus-menerus. Data tersebut kemudian diteruskan ke lapisan kontrol, di mana PLC Hywell memprosesnya secara

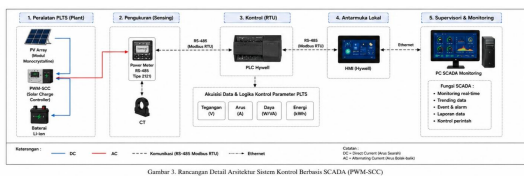
siklik berdasarkan logika kontrol yang telah diprogramkan, lalu menyimpannya ke memori internal. Pada lapisan komunikasi, data dikirimkan menggunakan protokol serial RS-485 (Modbus RTU) yang dipilih karena kemampuannya tahan terhadap noise elektromagnetik dari komponen switching. Akhirnya pada lapisan supervisi, HMI berfungsi menampilkan seluruh parameter dalam format visual dan menyediakan kanal intervensi manual bagi operator bila diperlukan.

Visualisasi struktur sistem kontrol SCADA yang dirancang ditampilkan pada Gambar 3, berupa diagram blok empat lapisan—sensor, kontrol, komunikasi, dan supervisi—beserta alur interaksinya. Diagram detail arsitektur dengan komponen yang lebih rinci ditampilkan pada Gambar 4. Sistem ini dirancang dengan kemampuan ekspor data ke PC monitoring melalui jalur komunikasi RS-485, sehingga selain berfungsi sebagai perangkat kontrol, sistem juga berperan sebagai platform pengumpulan data yang dapat dimanfaatkan untuk keperluan dokumentasi, evaluasi, dan pembelajaran.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Kontrol PLTS Off-Grid Berbasis SCADA

*Gambar 3 Diagram Blok Sistem Kontrol
PLTS Off-Grid Berbasis SCADA*



*Gambar 4 Rancangan Detail Arsitektur
Sistem Kontrol Berbasis SCADA*

Sistem dilengkapi dengan kapabilitas supervisori yang dirancang setara dengan sistem pemantauan PLTS pada skala komersial, sehingga pengalaman belajar mahasiswa akan terasa autentik dan menyerupai kondisi industri nyata. Pada satu sesi praktikum, mahasiswa dapat mengoperasikan HMI untuk membaca parameter operasi PLTS secara langsung, mengamati respons sistem terhadap perubahan kondisi lingkungan seperti kehadiran awan atau hujan melalui kurva daya pada layar, serta melakukan intervensi manual ketika diperlukan. Rancangan ini menekankan keterpaduan antara fungsi pemantauan, pengendalian,

dan pembelajaran dalam satu platform tunggal.

3) Analisis Teoritis Perilaku Sistem yang Dirancang

Pada bagian ini dijelaskan parameter operasi yang menjadi acuan rancangan sistem kontrol. Rancangan ini menggunakan kerangka teknis yang mengacu pada karakteristik komponen dan persamaan IEC 61724-1 (2017) sebagai dasar penyusunan logika kontrol pada PLC. Sistem dirancang untuk memantau korelasi antara intensitas radiasi matahari dengan daya keluaran PLTS secara real-time, sehingga lapisan sensor dan komunikasi SCADA dapat membaca dan meneruskan data parameter operasi dengan akurat. Berdasarkan karakteristik iradiasi horizontal global di kawasan tropis ekuatorial (Rifai et al., 2014), rentang waktu pukul 10.00 hingga 14.00 WITA ditetapkan sebagai periode operasi puncak yang menjadi acuan kalibrasi logika kontrol pada PLC.

Pengaruh suhu permukaan panel menjadi salah satu pertimbangan utama dalam rancangan. Karakteristik modul monocrystalline menunjukkan bahwa setiap peningkatan suhu

sebesar 1°C di atas Standard Test Condition (25°C) menyebabkan penurunan daya keluaran berkisar 0,4–0,5% (Pln dan Plts, 2020). Suhu udara rata-rata di Manado berkisar 26 hingga 30°C sepanjang tahun, dengan suhu permukaan panel yang dapat mencapai 50°C pada paparan matahari langsung. Karakteristik termal ini dijadikan acuan dalam rancangan agar sistem kontrol pada PLC dapat memantau dan menampilkan parameter suhu sebagai bagian dari kondisi operasi normal, sebagaimana pola yang dilaporkan Putranto (2021) maupun Kodo et al. (2024).

Tabel 3 Parameter Acuan untuk Verifikasi Sistem yang Dirancang

Parameter	Acuan	Keterangan
Performance Ratio (PR)	Rentang IEC 61724-1	Indikator mutu operasi standar
Jam Operasi Efektif	10.00–14.00 WITA	Periode peak power tropis
Koef. Panel Suhu	-0,4 ~ -0,5%/°C	Per 1°C di atas STC
Stabilitas Komunikasi	Kontinu via RS-485	Tanpa packet loss signifikan
Akurasi Akuisisi Data	Sesuai presisi power meter	Validasi dengan multimeter
Respons Sistem Kontrol	< 1 detik	Logika dasar PLC

Sumber: Standar IEC 61724-1 (2017); Pln dan Plts (2020)

Parameter yang ditampilkan pada Tabel 3 merupakan acuan rancangan yang dijadikan landasan teknis dalam menyusun logika kontrol dan kerangka pemantauan pada sistem SCADA. Performance Ratio sesuai standar IEC 61724-1 (2017) dan stabilitas komunikasi RS-485 ditetapkan sebagai dua indikator utama yang akan dipantau oleh sistem. Penetapan acuan ini memberikan landasan ilmiah bagi rancangan, sekaligus menjadi panduan teknis bagi penyusunan logika pemrosesan parameter di PLC.

Bila dibandingkan dengan studi sejenis, rancangan ini menempatkan kontribusinya pada aspek perancangan arsitektur sistem kontrol, bukan pada pelaporan nilai numerik kinerja. Senapan et al. (2022) merancang PLTS off-grid 3 kW menggunakan PVsyst, Putranto (2021) merancang PLTS hybrid 1230 WP, dan Kodo et al. (2024) merancang PLTS perkebunan berkapasitas 68,2 kWp. Rancangan ini melengkapi referensi-referensi tersebut dengan menyajikan sebuah cetak biru arsitektur kontrol berbasis SCADA yang spesifik untuk laboratorium vokasi, sebuah ranah

yang belum banyak digarap pada literatur sebelumnya.

4) Perbandingan dengan Penelitian Sejenis

Tabel 4 Perbandingan dengan Studi Sejenis

Peneliti	Kapasitas	Pendekatan	Fokus Studi
Studi ini	Lab vokasi	Rancangan konsep SCADA PLC-HMI	Arsitektur kontrol
Putranto (2021)	1230 WP	Pengujian lapangan	Kinerja kuantitatif
Senapan (2022)	3 kW	Simulasi PVsyst	Estimasi PR
Kodo (2024)	68,2 kWp	Analisis kalkulasi	Efisiensi sistem
Stefanie (2021)	600 Wp	Eksperimental + IoT	Monitoring data

Sumber: Putranto (2021); Senapan et al. (2022); Kodo et al. (2024); Stefanie (2021)

Berdasarkan ringkasan Tabel 4, rancangan ini menempati posisi unik sebagai satu-satunya konsep yang secara eksplisit merancang arsitektur kontrol SCADA berbasis PLC, bukan sekadar menambahkan fungsi monitoring pada sistem yang sudah ada. Stefanie (2021) memang menggunakan IoT, namun cakupan fungsinya terbatas pada observasi tanpa kapabilitas kontrol terpusat. Rancangan-rancangan lain dalam tabel tersebut tidak memerinci sistem kontrol yang digunakan, yang

menunjukkan bahwa aspek ini memang belum menjadi sorotan utama dalam literatur. Hal ini menegaskan posisi rancangan konsep ini sebagai pengisi celah yang nyata.

5) Aspek Pendidikan dan Teaching Factory

Dari sisi pendidikan, laboratorium teaching factory yang dirancang menawarkan pengalaman belajar yang lebih utuh dibandingkan setting laboratorium konvensional. Sistem dirancang sedemikian rupa sehingga mahasiswa dapat: melakukan perancangan dan pemasangan instalasi PLTS sesuai standar industri; mengoperasikan sistem SCADA berbasis PLC-HMI dalam kondisi operasi nyata; membaca, menafsirkan, dan menganalisis data monitoring time-series yang ditampilkan pada antarmuka; serta mengidentifikasi penyimpangan kinerja menggunakan data faktual yang disuplai sensor sistem.

Pendekatan rancangan ini sejalan dengan rekomendasi UNESCO-UNEVOC (2020) terkait pepaduan antara pendidikan formal dengan replikasi suasana industri yang autentik. Hidayati et al. (2023) dalam

studi di Politeknik Negeri Jakarta menunjukkan bahwa keberadaan perangkat PLTS yang nyata berdampak signifikan terhadap kompetensi teknis mahasiswa. Rancangan ini memperluas temuan tersebut dengan menambahkan dimensi sistem kontrol SCADA sebagai lapisan pembelajaran tambahan yang relevan dengan praktik industri saat ini, khususnya pada era digitalisasi sektor energi.

Rancangan ini berkontribusi pada SDGs 4 (Quality Education) melalui peningkatan mutu pendidikan vokasi yang berorientasi praktik, sekaligus mendukung SDGs 7 (Affordable and Clean Energy) melalui penguatan kapasitas lokal dalam pengembangan teknologi surya. Sebagai institusi yang berada di Indonesia Timur, Politeknik Negeri Manado memiliki peran strategis dalam mempersiapkan tenaga ahli yang siap menjawab kebutuhan industri energi terbarukan yang terus berkembang di kawasan ini.

6) Keterbatasan Studi

Sebagai sebuah rancangan konsep, perlu disampaikan beberapa batasan ruang lingkup rancangan secara terbuka. Pertama, fokus utama

rancangan ini terletak pada penyusunan arsitektur sistem kontrol, sehingga validasi pengukuran kinerja aktual tidak menjadi cakupan utama dan akan dilaksanakan pada tahap pembuatan prototype di masa mendatang. Kedua, logika kontrol yang dirancang untuk PLC saat ini masih difokuskan pada loop akuisisi data dasar; pengembangan mekanisme kontrol otomatis untuk manajemen beban adaptif menjadi peluang pengembangan lanjutan. Ketiga, kerangka rancangan yang disusun terbatas pada parameter listrik utama, sedangkan rancangan untuk pemantauan keandalan komponen jangka panjang, seperti degradasi modul atau penurunan kapasitas baterai, membutuhkan penyusunan rancangan instrumentasi tambahan yang dapat ditambahkan pada pengembangan berikutnya.

7) Kontribusi Keilmuan dan Praktis

Rancangan ini memberikan kontribusi pada dua ranah secara bersamaan. Pada ranah keilmuan, rancangan ini melengkapi literatur PLTS off-grid dengan sebuah referensi konsep sistem kontrol berbasis SCADA yang disusun mengacu pada standar internasional

IEC 61724-1 (2017). Pendekatan rancangan empat lapisan yang sistematis turut memperkenalkan kerangka kerja yang dapat direplikasi pada konteks laboratorium vokasi lain dengan kebutuhan teknis yang serupa.

Pada ranah praktis, rancangan ini dapat dimanfaatkan oleh tiga kelompok pengguna utama. Bagi institusi vokasi, rancangan ini menjadi cetak biru yang dapat diadaptasi dalam pengembangan laboratorium teaching factory serupa. Bagi industri energi terbarukan, pola arsitektur empat lapisan yang dirumuskan dapat menjadi acuan dalam mengembangkan sistem PLTS skala kecil hingga menengah dengan PWM-SCC sebagai pengendali pengisian baterai. Bagi pemerintah daerah, rancangan ini menyediakan model pengembangan kapasitas lokal yang dapat dikaitkan dengan program elektrifikasi daerah terpencil di Sulawesi Utara dan kawasan sekitarnya.

D. Kesimpulan

Rancangan konsep sistem kontrol berbasis SCADA bagi PLTS off-grid pada laboratorium teaching factory Politeknik Negeri Manado telah

berhasil disusun secara utuh. Sistem yang dirancang memiliki keunggulan berupa arsitektur empat lapisan terintegrasi—sensor, kontrol, komunikasi, dan supervisi—yang dipadukan melalui power meter RS-485, CT, PLC Hywell, dan HMI menjadi satu kesatuan yang terkoordinasi untuk memantau sekaligus mengendalikan parameter operasi PLTS secara real-time. Konfigurasi PLTS yang menjadi objek kendali memadukan modul monocrystalline berefisiensi 18–22%, PWM-SCC sebagai pengendali pengisian baterai, dan baterai lithium-ion sebagai media penyimpan energi yang andal.

Keunggulan lain dari rancangan ini adalah penggunaan kerangka teknis yang disusun mengacu pada IEC 61724-1 (2017), sehingga sistem yang dirancang memiliki landasan ilmiah yang dapat dipertanggungjawabkan. Persamaan-persamaan kunci—mulai dari daya keluaran panel, Final Yield, Reference Yield, Performance Ratio, hingga efisiensi sistem komprehensif—telah diintegrasikan menjadi dasar perhitungan pada logika kontrol PLC yang akan menampilkan parameter operasi pada HMI. Laboratorium yang dirancang

efektif sebagai sarana pengembangan kompetensi teknis mahasiswa di bidang PLTS dan SCADA, sekaligus berkontribusi nyata terhadap pencapaian SDGs 4 (Quality Education) dan SDGs 7 (Affordable and Clean Energy).

Sebagai saran untuk pengembangan ke depan, rancangan konsep ini disarankan untuk dilanjutkan ke tahap pembuatan prototype agar dapat diimplementasikan secara nyata. Beberapa arah pengembangan lanjutan yang disarankan: (1) realisasi prototype sistem yang dirancang disertai pengukuran kinerja jangka panjang untuk memvalidasi kerangka teknis yang telah disusun; (2) pengembangan modul logika kontrol otomatis pada PLC yang mampu mengelola beban secara adaptif berbasis kondisi baterai dan radiasi waktu nyata; (3) penyusunan rancangan instrumentasi tambahan untuk memantau keandalan komponen jangka panjang, seperti degradasi modul dan penurunan kapasitas baterai pada konteks iklim tropis Manado; serta (4) pengembangan rancangan integrasi data iklim BMKG ke dalam HMI

sebagai fitur perbandingan kinerja yang berjalan otomatis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi kepada Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado, yang telah menyediakan fasilitas Laboratorium Energi Baru Terbarukan beserta dukungan teknis selama proses perancangan berlangsung. Apresiasi juga disampaikan kepada para reviewer atas masukan konstruktif yang membantu menyempurnakan naskah rancangan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Fadli Rohman. (2012). Lithium-Ion Battery untuk kendaraan listrik dan aplikasi penyimpanan energi. *Jurnal Teknik Elektro Industri*, 10(2), 88–96.
- Halim, L., Halim, L., & Sudjana, O. (2020). Perancangan dan implementasi awal solar inverter untuk pembangkit listrik tenaga surya off grid. *Jurnal Teknologi UMJ*, 12(1), 31–38.
- Hidayati, N., Widiyatmoko, Ekayuliana, A., Ridlwan, H. M., & Sitorus, A. H. (2023). Desain PLTS 1 kWp off-grid sebagai media pembelajaran di Politeknik Negeri Jakarta. *Prosiding SNIV PNJ*, 2, 1–8.
- Husna, F. N., & Santoso, D. B. (2025). Simulasi PLTS off-grid rumah tangga di Karawang menggunakan Homer Pro. *JTE UNIBA*, 9(2), 548–555.

- IEC 61724-1. (2017). Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring. Geneva: IEC.
- Kodo, B. E., Likadja, F. J., & Mauboy, E. R. (2024). Perancangan PLTS off-grid pada area perkebunan Desa Bismarak. *Jurnal Teknik Elektro Terapan*, 1(1), 42–46.
- Pln dan Plts. (2020). Buku Panduan Pembangkit Listrik Tenaga Surya. Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan.
- Putranto, C. A. (2021). Pengujian dan implementasi PLTS sistem hybrid 1230 WP pada SMA Negeri 3 Surakarta. *Jurnal Teknik Energi*, 10(3), 478–487.
- Rifai, L. D., Tongkukut, S. H. J., & Raharjo, S. S. (2014). Analisis Intensitas Radiasi Matahari di Manado dan Maros. *Jurnal MIPA UNSRAT Online*, 3(1), 49–52.
- Rio, A. R., Siahaan, B. M., & Gani, E. (2024). Pemetaan Potensi Energi Matahari di Sulawesi Utara menggunakan Machine Learning K-Means. *Jurnal MIPA UNSRAT*, 14(2), 1–5.
- Rohaeni, E., Trisnamansyah, S., Wasliman, I., & Sauri, R. S. (2021). Implementation of teaching factory in improving the competence of vocational high school students. *Journal of Vocational Education Studies*, 6(1), 52–61.
- Sampeallo, A. S., & Galla, W. F. (2020). Analisis kinerja sistem PLTS off-grid dengan MPPT. *Jurnal Media Elektro*, 7(1), 12–21.
- Samsurizal. (2021). Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Jakarta: Penerbit Teknik.
- Senapan, M. F., Senapan, L. Y. F., & Senapan, M. (2022). Simulasi dan perancangan PLTS off-grid 3 kW menggunakan software PVsyst. *JTE UNIBA*, 8(2), 73–85.
- Stefanie, F. C. (2021). Analisis performansi PLTS off-grid 600 Wp menggunakan data akuisisi berbasis IoT. *ELKOMIKA*, 9(4), 803–815.
- UNESCO-UNEVOC. (2020). Teaching Factory: TVET Ecosystem. Bonn: UNESCO-UNEVOC.
- Wibowo, M., Septian, A., & Rojak, O. A. (2023). Analisis teknis dan ekonomi PLTS off-grid pada kios coffee. *Jurnal Rekayasa Energi*, 5(1), 2400–2419.