

# Sistem SCADA Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Stand-alone*

<sup>1\*</sup>Muldi Yuhendri, <sup>1</sup>Weli Efianti, <sup>1</sup>Ichwan Yelfianhar

<sup>1</sup>Departemen Teknik Elektro, Universitas Negeri Padang, Padang

<sup>1</sup>muldiy@ft.unp.ac.id, <sup>2</sup>wellyelfianty@gmail.com, <sup>3</sup>ichwan\_y@ft.unp.ac.id

## Article Info

### Keyword:

Panel surya  
SCADA  
*Internet of Things*

Copyright © 2025 -SNTE  
All rights reserved

## ABSTRACT

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah salah satu pembangkit Listrik dari sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar dikembangkan di Indonesia. Untuk daerah yang belum terjangkau jaringan listrik, PLTS dapat dibuat dalam konfigurasi *stand-alone* dengan menambah baterai sebagai sumber energi cadangan. Ketika panel surya tidak menghasilkan daya. Untuk meningkatkan kehandalan PLTS *stand-alone*, diusulkan sistem kendali yang terawasi dengan memanfaatkan teknologi *Internet of Things* (IoT) yang disebut juga dengan *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA). Sistem SCADA PLTS *stand-alone* diusulkan dengan menggunakan *Programmable Logic Controller* (PLC) sebagai pusat controller dengan display control berupa *Human Machine Interface* (HMI), *PC server*, *PC client* dan *smartphone*. Konsep ini memungkinkan PLTS dikendalikan dan dimonitor dari jarak jauh. Sistem SCADA yang diusulkan diimplementasikan pada panel surya 5 x 50 WP. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem SCADA yang diusulkan telah sukses mengendalikan PLTS *stand-alone* dari berbagai display, baik dari HMI, *PC server*, *PC client* maupun dari *smartphone*. Sistem SCADA yang dibuat juga telah sukses menampilkan data-data parameter PLTS yang dimonitor, sehingga PLTS dapat terawasi dengan baik.

### Corresponding Author:

Muldi Yuhendri,

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang, Padang,

Jl. Prof. Hamka Air Tawar, Padang, Sumatera Barat.

Email: muldiy@ft.unp.ac.id

## I. PENDAHULUAN

Wilayah Indonesia yang berada di garis khatulistiwa membuat seluruh daerah Indonesia mendapat cahaya matahari yang merata sepanjang waktu, sehingga cahaya matahari sebagai salah satu sumber energi terbarukan ini sangat potensial dimanfaatkan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Di daerah daerah atau pulau terpencil yang belum terhubung dengan jaringan listrik, PLTS menjadi pilihan bagi masyarakat untuk mendapatkan energi listrik [1]. Pemanfaatan sumber energi terbarukan ini didukung oleh pemerintah melalui Kebijakan Energi Nasional (KEN) yang ditetapkan melalui Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014, dimana pemanfaatan energi terbarukan ditargetkan mencapai 30% pada tahun 2050.

Salah satu kendala dalam pengoperasian PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan adalah ketersediaan cahaya matahari yang tidak stabil sepanjang hari, terutama pada malam hari. Hal ini membuat kontinuitas penyediaan daya listrik untuk konsumen bisa terhenti ketika cahaya matahari tidak ada [2]-[4]. Untuk mengatasi hal ini telah banyak dikembangkan PLTS skema *stand-alone* dengan menambahkan penyimpan energi lain yang dapat menyuplai daya Listrik ke konsumen. Ketika panel surya sedang tidak mendapat

cahaya matahari yang cukup. Salah satu penyimpan energi yang banyak digunakan adalah baterai [5]. Pada PLTS *stand-alone*, baterai bekerja dalam dua fungsi, yaitu sebagai penyimpan energi listrik saat energi Listrik yang dihasilkan panel surya melebihi kapasitas beban pada siang hari dan juga berfungsi sebagai penyuplai daya listrik ke beban saat panel surya tidak mendapat cahaya matahari pada saat mendung atau malam hari [6].

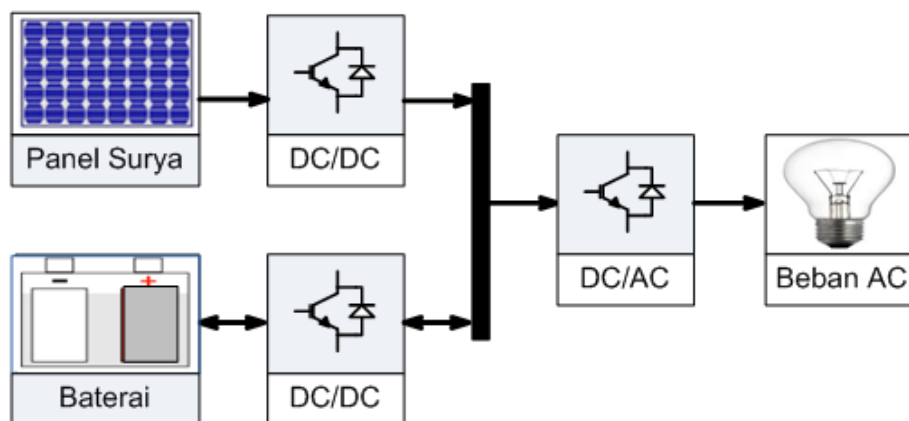
Dinamika Cahaya matahari yang selalu bervariasi sepanjang waktu dan dinamika perubahan beban yang mempengaruhi kinerja PLTS *stand-alone* membuat system pengoperasian dan pengendalian PLTS *stand-alone* harus handal menghadapi perubahan tersebut. Untuk mengatasi masalah ini telah banyak dikembangkan sistem kendali terawasi (*supervisory control*) yang memungkinkan operator mengendalikan dan memonitor kondisi dari system, yang sering juga disebut dengan *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) [7]-[9]. Perkembangan teknologi dalam bidang Internet of Thing (IoT) telah memungkinkan system control dan monitoring dilakukan dari jarak jauh, sehingga lebih fleksibel dan lebih memudahkan operator dalam mengoperasikan dan memonitor system [10]. Hal ini juga telah diterapkan pada PLTS dengan beberapa jenis hardware, seperti dengan menggunakan Arduino [11], Programable Logic Controller (PLC) dan sebagainya [12],[13]. PLC lebih handal dalam sistem kendali dan pengolahan data yang kompleks dibandingkan Arduino [14]-[15], oleh sebab itu dalam paper ini diusulkan sistem SCADA PLTS *stand-alone* dengan menggunakan PLC yang dapat dioperasikan dari jarak jauh dengan memanfaatkan teknologi IoT. Sistem control dan monitoring PLTS disediakan dalam berbagai display, yaitu HMI, PC server, PC *client* dan *smartphone*. PC server juga dilengkapi dengan data logger yang memungkinkan operator dalam melihat data yang telah disimpan sebelumnya. Sistem SCADA diimplementasikan dengan software WINCC yang akan mengendalikan PLTS *stand-alone* dengan panel surya 5 x 50 WP dan di backup oleh baterai 12 Volt 12 Ah. Hasil perancangan diverifikasi melalui eksperimen di laboratorium yang akan dibahas dalam bagian berikutnya.

Bahasan paper ini terdiri dari empat bab, yaitu bab 1 pendahuluan, bab 2 system SCADA PLTS *stand-alone* dengan sub-bab Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *stand-alone* dan system SCADA, bab 3 hasil dan pembahasan serta bab 4 penutup.

## II. SISTEM SCADA PLTS STAND-ALONE

### A. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Stand-alone

PLTS *stand-alone* merupakan PLTS yang berdiri sendiri tanpa terhubung dengan jaringan listrik. Dalam paper ini, PLTS *stand-alone* dirancang untuk beban arus bolak balik (AC), sehingga harus dilengkapi dengan inverter. Gambar 1 menunjukkan skema PLTS *stand-alone* yang diusulkan. PLTS *stand-alone* terdiri dari panel surya sebagai sumber daya Listrik utama yang akan disalurkan ke beban, baterai untuk menyimpan daya Listrik dari panel surya dan juga sebagai penyuplai daya ke beban ketika panel surya tidak berfungsi, Konverter DC-AC (inverter) untuk mengkonversikan tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak balik (AC) sesuai dengan yang dibutuhkan beban, Konverter DC-DC untuk mengatur tegangan output panel surya agar sesuai dengan tegangan input inverter dan mengatur tegangan untuk pengisian baterai.

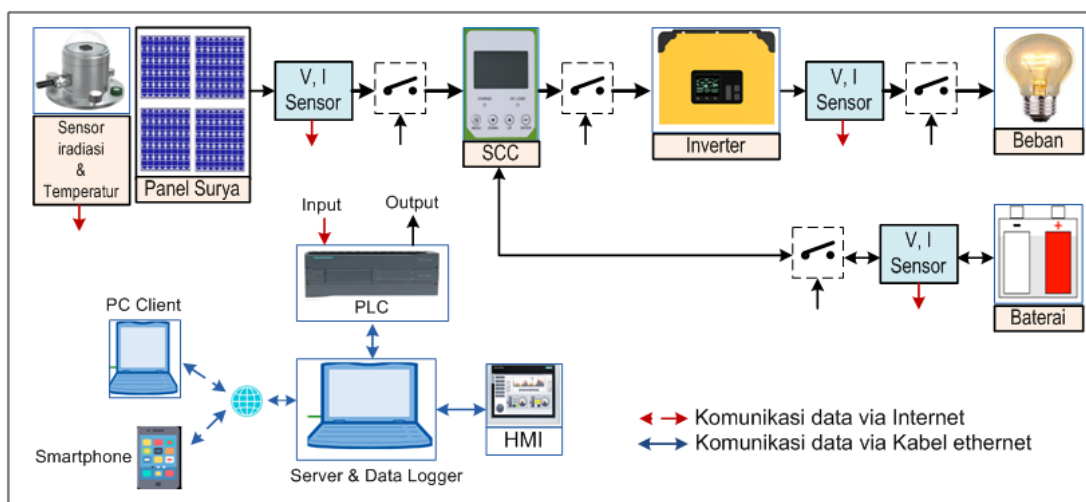


Gbr. 1 Skema PLTS *stand-alone*

Panel surya akan menghasilkan tegangan jika permukaannya dikenai oleh cahaya matahari. Nilai tegangan, arus daya yang dihasilkan panel surya dipengaruhi oleh irradiansi cahaya matahari yang mengenai permukaan panel surya dan temperature pada panel surya tersebut. Nilai daya dan tegangan panel surya ini berbanding lurus dengan irradiansi dan berbanding terbalik dengan temperatur [10]. Daya yang dihasilkan panel surya ini akan disalurkan ke beban melalui converter DC-DC dan Inverter. Jika daya yang dihasilkan melebihi kebutuhan beban, maka akan disalurkan ke baterai melalui converter DC-DC dua arah yang dapat menyalurkan dari panel surya ke baterai dan dari baterai ke beban.

B. Sistem SCADA

Sistem SCADA untuk PLTS *stand-alone* dirancang untuk mempermudah system pengoperasian dan pengawasan PLTS secara real time baik dari jarak dekat maupun dari jarak jauh. Dari jarak dekat, pengoperasian dan monitoring dapat dilakukan melalui layer HMI ataupun melalui layar PC server. Pengendalian dari jarak jauh dapat dilakukan melalui *smartphone* maupun melalui *PC client*. Gambar 2 menunjukkan skema system SCADA PLTS *stand-alone* yang diusulkan.



Gbr. 2 Skema Sistem SCADA PLTS *stand-alone*

Sistem SCADA yang diusulkan terdiri dari PLC S7 1200 1215 DC/DCDC sebagai pusat controller dengan display kontrol berupa HMI TP 700 comfort, *PC client* dan *PC server*. PLC dilengkapi dengan modul input analog yang memungkinkan data dari sensor berupa sinyal analog dapat diproses oleh PLC. Komponen PLC, HMI dan *PC server* terhubung melalui kabel ethernet, sedangkan *PC client* dan *smartphone* tersambung dengan server melalui jaringan internet. Sistem kendali diterapkan dengan menggunakan relay untuk mengatur penyaluran dari dari panel surya ke SCC, aliran daya dari SCC ke baterai atau sebaliknya, aliran daya dari SCC ke inverter dan aliran daya dari inverter ke beban.

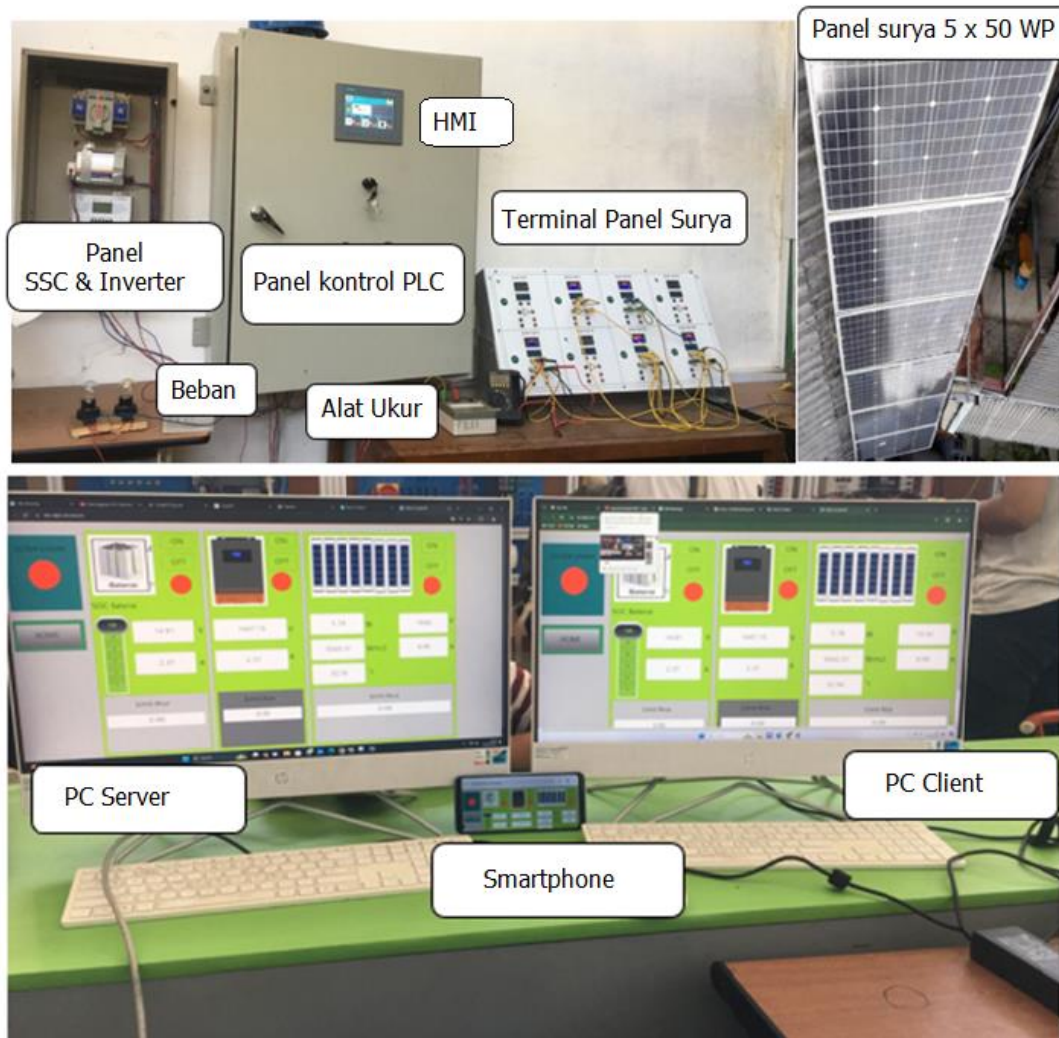
Parameter yang diamati pada panel surya mencakup nilai irradiansi dan temperatur panel surya, tegangan, arus dan daya yang dihasilkan panel surya. Parameter baterai yang diamati mencakup tegangan, arus dan *State of Charge* (SoC) baterai. Sedangkan parameter yang diamati pada sisi inverter adalah tegangan dan arus keluaran inverter.

Tampilan layar HMI dibuat dalam multi layer, yang terdiri dari layar utama untuk masuk ke system SCADA, layar untuk kontrol dan monitoring panel surya, layar untuk kontrol dan monitoring baterai dan layar untuk kontrol dan monitoring inverter. Pada *PC server*, *PC client* dan *smartphone* tampilan layarnya dibuat 1 halaman yang mencakup untuk semuanya. Setiap komponen, yaitu panel surya, baterai dan inverter dilengkapi dengan button ON dan OFF untuk mengoperasikan masing-masing system. Untuk menghindari PLTS dari arus hubung singkat, maka pada setiap komponen juga dilengkapi dengan proteksi arus lebih. Besar nilai arus yang diizinkan mengalir dari panel surya, baterai dan inverter dapat diatur pada masing masing layarnya di HMI ataupun display lain. Jika terjadi arus lebih atau hubung singkat, maka relay akan memutuskan aliran arus dari komponen tersebut.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancangan system SCADA untuk PLTS diuji dan divalidasi melalui eksperimen di laboratorium. Gambar 3 menunjukkan instalasi hardware system SCADA yang dibuat. Panel surya yang akan diuji dipasang di atas atap laboratorium dengan terminal masing-masingnya terdapat di dekat panel control dalam laboratorium. Ada dua panel control yang digunakan, yaitu panel ukuran 80 x 60 x 30 cm untuk penempatan PLC, baterai dan sensor serta panel kontrol ukuran 30 x 40 x 20 cm untuk penempatan SSC dan inverter. HMI ditempatkan pada panel control utama, sedangkan PC server, PC client ditempatkan di meja yang ada di laboratorium tersebut. Pada panel utama juga terdapat sakelar utama untuk mengaktifkan sistem SCADA.

Untuk memperoleh data mengenai arus baterai, inverter, dan panel surya, digunakan sensor arus ACS712. Data tegangan baterai dan panel surya diperoleh dari sensor tegangan DC DVV 100, sedangkan tegangan output inverter diperoleh dari sensor tegangan ZMPT101B. Data suhu panel surya diambil menggunakan sensor Thermocouple tipe K dan data irradiasi panel surya diperoleh dengan menggunakan sensor Pyranometer PYR20. Kapasitas baterai atau State of Charge (SOC) ditentukan berdasarkan nilai tegangan baterai. Pengaturan tegangan pengisi baterai dan tegangan input inverter dilakukan dengan solar charger yang dilengkapi dengan sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dengan kapasitas 30 Ampere. Baterai yang digunakan adalah baterai kering dengan kapasitas 12 Volt 12 Ah, dan tegangan pengisian baterai diatur pada 13,5 Volt. Beban AC yang digunakan dalam pengujian ini berupa lampu pijar



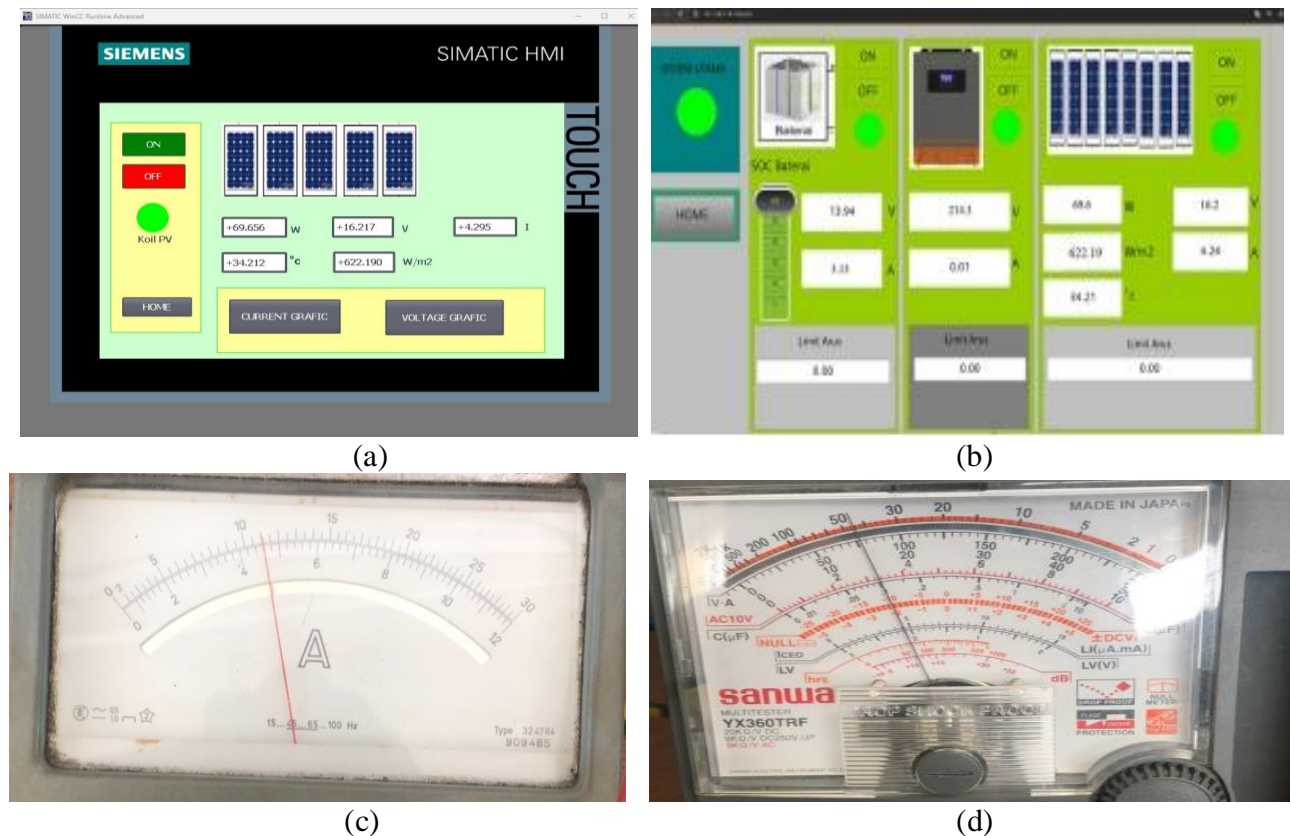
Gbr. 3 Instalasi hardware pengujian sistem SCADA PLTS *stand-alone*

Sistem SCADA akan aktif ketika sakelar utama yang ada di panel kontrol utama diaktifkan. Selanjutnya dilakukan seting limit arus panel surya, baterai dan inverter yang dapat dilakukan di layar HMI, PC server, PC *client* atau pada *smartphone*. Untuk mengaktifkan masing-masing komponen cukup menekan button START dan untuk menonaktifkannya dengan menekan button STOP. Indikator komponen aktif ditunjukkan dengan warna hijau, sedangkan kondisi tidak aktif ditunjukkan dengan indicator merah, seperti yang terdapat pada Gambar 3. Setiap parameter yang dimonitor disimpan di PC server dengan tampilan data logger seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.

	A	B	C	D	E
1	VarName	TimeString	VarValue	Validity	Time_ms
2	Data_Baterai_amper_arus_bat	01/08/2024 11:30	3,13187	1	4,52E+10
3	output_suhu_panel	01/08/2024 11:30	34,22743	1	4,52E+10
4	Data_panel_volt_teg_panel	01/08/2024 11:30	13,36806	1	4,52E+10
5	daya_dayapv	01/08/2024 11:30	47,59179	1	4,52E+10
6	Data_baterai_soc_bat	01/08/2024 11:30	98,36944	1	4,52E+10
7	Data_baterai_volt_teg_bat	01/08/2024 11:30	13,94675	1	4,52E+10
8	Data_inverter_amper_arus_invert	01/08/2024 11:30	1,17E-02	1	4,52E+10
9	Data_inverter_teg_inverter	01/08/2024 11:30	214,5893	1	4,52E+10
10	Data_panel_amper_arus_panel	01/08/2024 11:30	3,576981	1	4,52E+10
11	output_radiasi_panel	01/08/2024 11:30	588,3568	1	4,52E+10
12	Data_Baterai_amper_arus_bat	01/08/2024 11:35	3,154248	0	4,52E+10
13	output_suhu_panel	01/08/2024 11:35	34,28743	0	4,52E+10
14	Data_panel_volt_teg_panel	01/08/2024 11:35	14,36806	0	4,52E+10
15	daya_dayapv	01/08/2024 11:35	48,59179	0	4,52E+10
16	Data_baterai_soc_bat	01/08/2024 11:35	98,86944	0	4,52E+10
17	Data_baterai_volt_teg_bat	01/08/2024 11:35	13,96675	0	4,52E+10
18	Data_inverter_amper_arus_invert	01/08/2024 11:35	1,17E-02	0	4,52E+10
19	Data_inverter_teg_inverter	01/08/2024 11:35	215,5893	0	4,52E+10
20	Data_panel_amper_arus_panel	01/08/2024 11:35	3,636981	0	4,52E+10
21	outout radiasi panel	01/08/2024 11:35	588.3568	0	4.52E+10

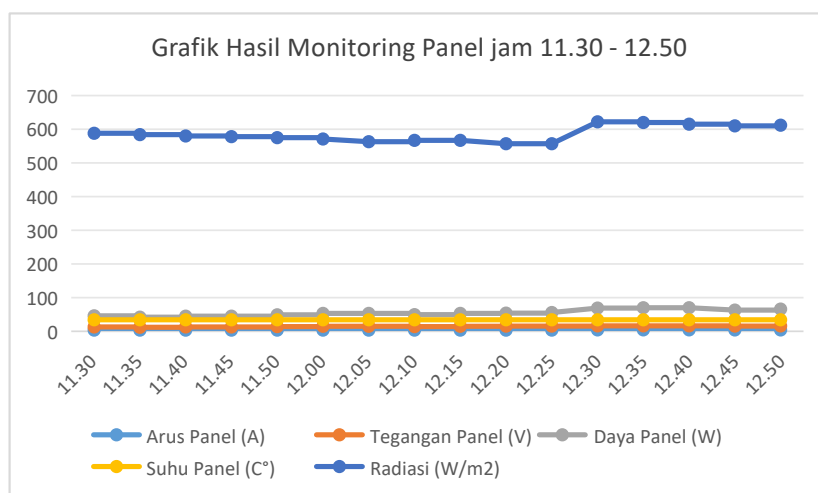
Gbr. 4 Tampilan data logger pada PC server

Pertama dilakukan pengoperasian panel surya seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5. Pengujian ini dilakukan pada siang hari mulai jam 11.30 WIB. Gambar 5(a) menunjukkan tampilan HMI untuk layar panel surya pada saat panel surya diaktifkan atau dihubungkan ke SSC melalui relay. Gambar 5(b) menunjukkan display pada PC server, sedangkan display pada PC *client* dan *smartphone* sama dengan PC server ini. Data pada tampilan monitor menunjukkan bahwa panel surya menghasilkan daya sekitar  $\pm 69,6$  W, arus  $\pm 4,2$  A, tegangan  $\pm 16.2$  V, suhu  $34.2$  °C, dan radiasi sekitar  $\pm 622,1$  W/m<sup>2</sup>. Data ini sesuai dengan data yang terbaca oleh alat ukur yang digunakan untuk validasi data semua parameter, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5(c) untuk ampermeter yang mengukur arus panel surya dan Gambar 5(d) yang menunjukkan hasil pembacaan alat ukur tegangan panel surya menggunakan multimeter. Hasil ini menunjukkan bahwa pengoperasian dan monitoring panel surya telah sukses dilakukan.



Gbr. 5 Kontrol dan monitoring Panel Surya, (a) Tampilan HMI, (b) Tampilan IOT, (c) Pembacaan alat ukur amperemeter untuk arus panel surya, (d) pembacaan tegangan panel surya pada multimeter

Selanjutnya dilakukan pengujian panel surya selama 80 menit mulai jam 11.30 sampai dengan 12.50 WIB dengan sampel data logger diambil setiap 5 menit. Gambar 6 menunjukkan grafik parameter surya yang dimonitor dan disimpan di PC server.

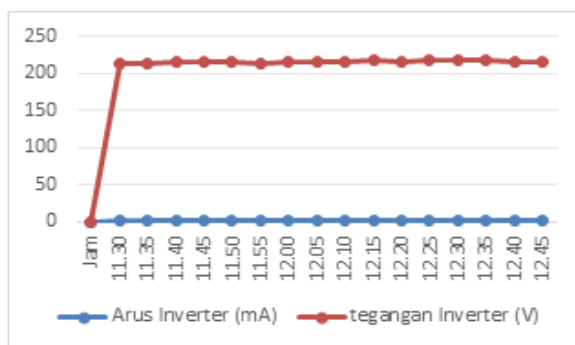


Gbr. 6 Grafik data panel surya.

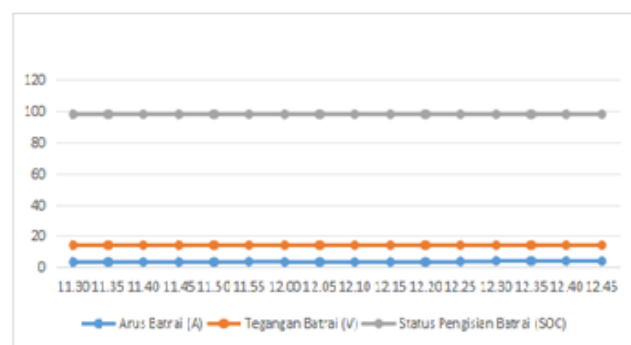
Pengujian yang sama dilakukan untuk baterai dan inverter. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kontrol dan monitoring baterai dan inverter telah bekerja dengan baik dengan data monitoring yang diperoleh seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 7. Grafik tegangan dan arus inverter pada Gambar 7(a) menunjukkan bahwa

inverter mengalirkan arus sebesar 1,17 mA ketika dibebani dengan dua buah lampu pijar 5 Watt, sedangkan tegangan yang dihasilkan sekitar 215 Volt sesuai dengan rating tegangan yang dibutuhkan beban. Grafik parameter baterai pada Gambar 7(b) menunjukkan bahwa tegangan baterai sekitar 13,94 V sepanjang periode pengukuran. Stabilitas ini menunjukkan bahwa sumber daya yang disuplai oleh panel surya atau sistem pengisian tidak mengalami fluktuasi yang signifikan dan baterai dalam kondisi pengisian pada siang hari. Sedangkan arus baterai berkisar antara 3,12 A hingga 3,9 A. Terjadi lonjakan signifikan dalam arus baterai pada jam 12:30 (3,9 A), setelah itu arus menunjukkan penurunan. Fluktuasi ini dapat disebabkan oleh perubahan beban sistem atau aktivitas pengisian yang lebih intensif pada waktu tersebut. SOC baterai tetap konstan pada 98% sepanjang periode pengukuran. Ini menunjukkan bahwa baterai hampir penuh dan tidak mengalami perubahan kapasitas yang signifikan selama pengukuran.

Semua hasil pengujian menunjukkan bahwa system SCADA yang diusulkan telah sukses mengontrol dan memonitoring parameter PLTS *stand-alone* dengan baik, sehingga dapat disimpulkan bahwa system SCADA yang dirancang dengan menggunakan PLC sudah sesuai dengan perencanaan.



(k)



(7)

Gbr. 7 Grafik data inverter dan baterai, (a) data inverter, (b) data baterai

#### IV. PENUTUP

Sistem SCADA untuk PLTS *stand-alone* diusulkan dengan menggunakan PLC yang dilengkapi dengan teknologi IoT yang memungkinkan PLTS dapat dioperasikan dan diawasi dari jarak jauh. Sistem SCADA dirancang dengan menggunakan PLC S7 1200 dengan display kontrol dan monitor berupa HMI TP 700 comfort, *smartphone*, PC *client* dan PC server. Sistem SCADA diimplementasikan dengan software WINCC yang diintegrasikan dengan TIA portal. Sistem control diterapkan hanya untuk menghubungkan dan memutuskan aliran daya dari panel surya ke SSC, aliran daya dari SSC ke baterai atau sebaliknya, aliran daya dari SSC ke inverter dan aliran daya dari inverter ke beban. Parameter yang dimonitor mencakup daya, arus, tegangann, temperatur dan irradiansi panel surya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa system SCADA yang diusulkan telah sukses mengendalikan dan memonitor PLTS *stand-alone* dengan baik.

Pengujian ini baru sebatas skala laboratorium. Untuk menguji kehandalan alat, perlu dilakukan pengujian yang lebih lama dengan berbagai perubahan kondisi cahaya dan perubahan beban.

#### REFERENSI

- [1] F. Azizah and M. Yuhendri, "Solar Panel Monitoring and Control System Using Human Machine Interface," *Andalasian International Journal of Applied Science, Engineering and Technology.*, vol. 2, no. 03, pp. 149–158, 2022.
- [2] D. Benavides, P. Arévalo, A. Criollo, M. Tostado-Véliz, and F. Jurado, "Multi-mode monitoring and energy management for photovoltaic-storage systems," *Renewable Energy*, vol. 230, no. May, 2024.
- [3] S. Jain, S. Dhara and V. Agarwal, "A Voltage-Zone Based Power Management Scheme With Seamless Power Transfer Between PV-Battery for OFF-Grid Stand-Alone System," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 1, pp. 754-763, Jan.-Feb. 2021

- 
- 
- [4] I. Kurniawan, M. Yuhendri, A. Hendra, and R. Hidayat, "Implementation of Maximum power control of Solar Panels using Modified Perturb and Observe Algorithm based on Adaptive Neuro Fuzzy Inference System," *Journal of Industrial Automation and Electrical Engineering.*, vol. 01, no. 01, pp. 200–208, 2024.
- [5] H. W. Yan *et al.*, "Battery Lifetime Extension in a Stand-Alone Microgrid With Flexible Power Point Tracking of Photovoltaic System," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 11, no. 2, pp. 2281-2290, April 2023.
- [6] N. A. Kamarzaman, S. I. Sulaiman, A. I. M. Yassin, H. Zainuddin, and I. R. Ibrahim, "A modified honey badger algorithm for optimal sizing of an AC coupled stand-alone photovoltaic–battery system," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 902–909, 2022
- [7] A. B. Abdulsalam, H. A. J. Alsaadi and Z. Hamodat, "Control and Management of Solar PV Grid Using Scada System," *2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, Ankara, Turkey, 2022, pp. 1-5.
- [8] 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," *Renewable Energy*, vol. 171, pp. 1115–1127, 2021.
- [9] M. R. Alfiansyah, Ta Ali, M. Yuhendri, and J. Sardi, "Supervisory control and data acquisition system for solar panel based on Internet of things (IoT)," *Journal of Industrial Automation and Electrical Engineering.*, vol. 01, no. 01, pp. 145–154, June 2024.
- [10] R. Mayangsari and M. Yuhendri, "Sistem Kontrol dan Monitoring Pembangkit Listrik Tenaga Surya Berbasis Human Machine Interface dan Internet of Thing," *JTEIN Jurnal Teknik. Elektro Indonesia.*, vol. 4, no. 2, pp. 738-749, 2023.
- [11] A. López-Vargas, M. Fuentes and M. Vivar, "IoT Application for Real-Time Monitoring of Solar Home Systems Based on Arduino™ With 3G Connectivity," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 2, pp. 679-691, 15 Jan.15, 2019
- [12] I A. Nedaei *et al.*, "An Intelligent Condition Monitoring Scheme For Photovoltaic Systems using Programmable Logic Controller," *2024 3rd International Conference on Energy Transition in the Mediterranean Area (SyNERGY MED)*, Limassol, Cyprus, 2024, pp. 1-5.
- [13] A. Khadra and R. Rammal, "SCADA System for Solar Backup Power System Automation," *2022 International Conference on Smart Systems and Power Management (IC2SPM)*, Beirut, Lebanon, 2022, pp. 75-79.
- [14] M. Gaffurini, P. Bellagente, A. Depari, A. Flammini, E. Sisinni and P. Ferrari, "Virtual PLC in Industrial Edge Platform: Performance Evaluation of Supervision and Control Communication," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 73, pp. 1-10, 2024.
- [15] C. Sang, J. Wu, J. Li and M. Guizani, "From Control Application to Control Logic: PLC Decompilation Framework for Industrial Control System," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 19, pp. 8685-8700, 2024.