

Kendali dan Monitoring Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Stand Alone* Berbasis *Human Machine Interface*

Emilia Mustafa^{*)1}, Muldi Yuhendri², Juli Sardi³, Doni Triputra Yanto⁴,
^{1,2,3,4}Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang, Indonesia

^{*)}Corresponding author, emiliamustafa12@gmail.com

Abstrak

Kebutuhan terhadap energi listrik saat ini semakin meningkat seiring dengan pesatnya perkembangan peralatan-peralatan yang menggunakan daya listrik dipakai oleh manusia dalam kehidupan sehari-hari. Mulai dari peralatan rumah tangga, peralatan perkantoran sampai pada peralatan produksi di industri. Umumnya daya listrik untuk peralatan-peralatan ini diperoleh dari jaringan listrik yang disediakan oleh pemerintah. Hal ini menjadi masalah bagi daerah yang belum terjangkau oleh jaringan listrik. Untuk mengatasi hal ini, maka dapat digunakan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) stand alone dengan memanfaatkan energi cahaya matahari sebagai sumber energi primernya. Agar PLTS stand alone dapat bekerja dengan baik, maka PLTS tersebut perlu dikendalikan dan dimonitor. Paper ini mengusulkan system kendali dan monitoring PLTS stand alone dengan menggunakan Human Machine Interface (HMI) yang dilengkapi dengan Programable Logic Controller (PLC). PLTS stand alone yang diusulkan terdiri dari delapan panel surya 50 WP, solar charger, inverter, baterai dan beban. Untuk mendapatkan data yang akan dimonitor, maka digunakan sensor yang outputnya akan diolah oleh PLC dan ditampilkan pada HMI. Hasil eksperimen di laboratorium menunjukkan bahwa system kendali dan monitoring PLTS stand alone yang diusulkan telah bekerja dengan baik sesuai dengan yang diharapkan.

INFO.

Info. Artikel:

No. 384

Received. March, 28, 2023

Revised. May, 19, 2023

Accepted. May, 24, 2023

Page. 179 – 189

Kata kunci:

- ✓ PLTS
- ✓ Stand Alone
- ✓ Human Machine Interface
- ✓ PLC S
- ✓ Sistem Monitoring

Abstract

The need for electrical energy is currently increasing along with the rapid development of equipment that uses electrical power to be used by humans in everyday life. Ongoing from household equipment, office equipment to production equipment in the industry. Generally the electrical power for these equipment is obtained from the electricity network provided by the government. This is a problem for areas that are not covered by the electricity network. To overcome this, a stand alone solar power plant (PLTS) can be used by utilizing solar energy as its primary energy source. In order for a stand alone PLTS to work properly, the PLTS needs to be controlled and monitored. This paper proposes a stand alone PLTS control and monitoring system using a Human Machine Interface (HMI) equipped with a Programmable Logic Controller (PLC). The proposed stand-alone PLTS consists of eight 50 WP solar panels, solar charger, inverter, battery and load. To get the data to be monitored, a sensor is used whose output will be processed by the PLC and displayed on the HMI. The experimental results in the laboratory show that the proposed stand alone PLTS control and monitoring system has worked well as expected.

PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu bentuk energi yang sangat banyak digunakan dalam berbagai kebutuhan kehidupan manusia. Eenergi listrik digunakan untuk berbagai peralatan, mulai dari peralatan rumah tangga, peralatan perkantoran, peralatan industri, bahkan sampai pada peralatan transportasi [1]. Energi listrik ini dapat diperoleh dari berbagai sumber, seperti pembangkit listrik tenaga air, tenaga uap, baterai, pembangkit listrik dari energi terbarukan dan sebagainya. Umumnya konsumen energi listrik mendapatkan daya listrik dari jaringan listrik yang sudah disediakan pemerintah atau Perusahaan Listrik Negara (PLN). Namun belum semua daerah atau wilayah terjangkau oleh jaringan listrik, terutama daerah terpencil atau pulau yang jauh dari keramaian [2].

Untuk daerah-daerah yang belum terjangkau jaringan listrik, maka pemanfaatan energi terbarukan untuk pembangkit tenaga listrik adalah salah satu pilihan yang tepat untuk mendapatkan daya listrik. Beberapa sumber energi terbarukan yang dapat digunakan untuk pembangkit tenaga listrik antara lain mikro hidro, cahaya matahari, kecepatan angin dan sebagainya [3]-[5].

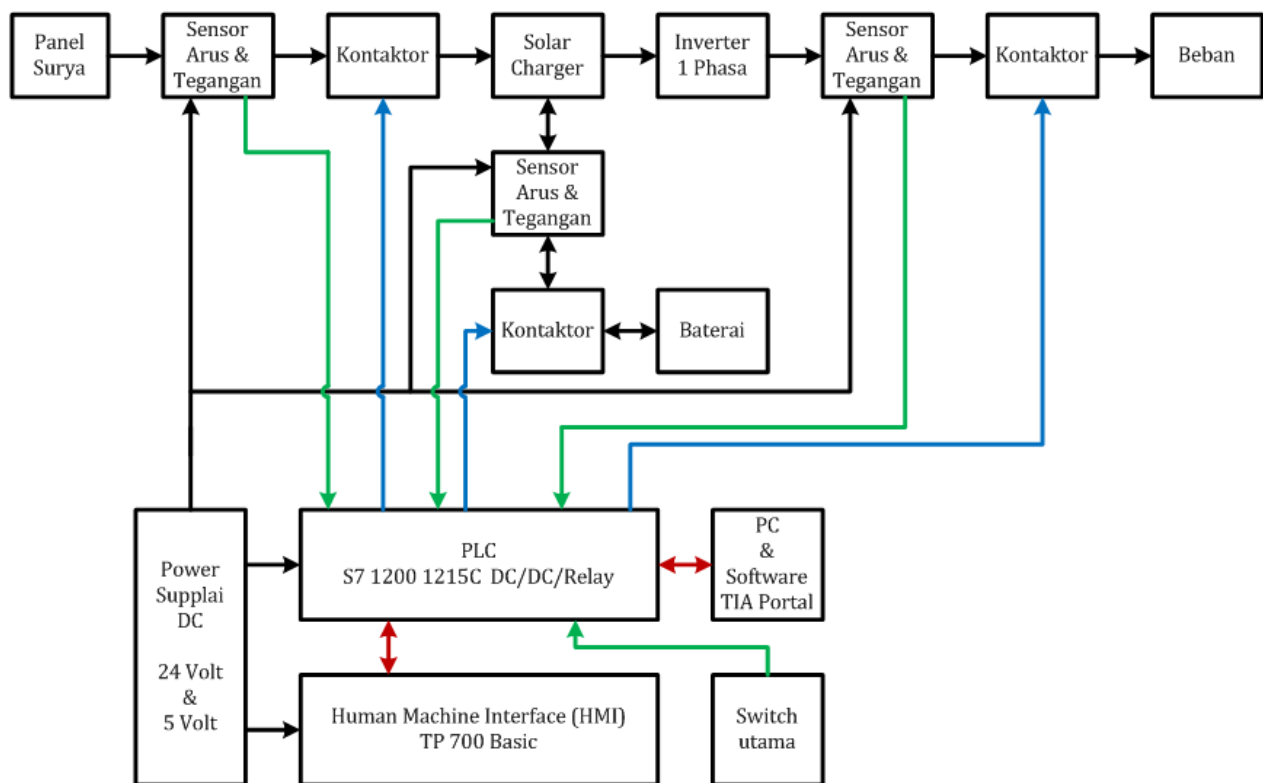
Indonesia adalah salah satu negara yang terletak di garis khatulistiwa dengan cahaya matahari yang memadai sepanjang masa [6]-[7]. Oleh sebab itu, pemanfaatan cahaya matahari untuk pembangkit tenaga listrik sangat memungkinkan untuk dikembangkan, terutama untuk daerah-daerah yang belum terjangkau oleh jaringan listrik. Energi cahaya matahari dapat dikonversikan menjadi daya listrik dengan menggunakan panel surya, dimana panel surya ini akan menghasilkan daya listrik dalam bentuk tegangan searah [8]-[10]. PLTS ini dapat dirancang berdiri sendiri tanpa terhubung dengan jaringan atau disebut juga dengan PLTS stand alone dengan beberapa persyaratan yang harus dipenuhi, seperti kontinuitas penyediaan daya listrik, standar tegangan yang dibutuhkan, kapasitas daya dan sebagainya [11]-[14].

Masalah kontinuitas adalah hal yang sangat perlu diperhatikan pada PLTS stand alone. Hal ini disebabkan oleh ketersediaan cahaya matahari sebagai sumber energi utama pada PLTS hanya tersedia pada siang hari, sementara daya listrik juga dibutuhkan oleh konsumen pada malam hari, seperti untuk kebutuhan penerangan dan sebagainya. Oleh sebab itu, PLTS stand alone harus dapat menyediakan energi cadangan yang dapat digunakan pada malam hari. Untuk mengatasi hal ini, biasanya PLTS stand alone dilengkapi dengan baterai, dimana baterai ini akan diisi pada saat panel surya menghasilkan daya listrik siang hari dan daya pada baterai tersebut dapat digunakan pada malam hari [15] [16] [17]. Hal lain yang perlu diperhatikan pada PLTS stand alone adalah standar tegangan yang dibutuhkan konsumen. Berhubung peralatan listrik yang digunakan konsumen banyak dalam bentuk tegangan bolak balik, maka tegangan searah yang dihasilkan oleh PLTS harus dikonversikan ke tegangan bolak balik dengan menggunakan inverter, dimana inverter ini harus dapat menghasilkan tegangan bolak balik dan frekuensi sesuai dengan rating tegangan dan frekuensi yang dibutuhkan konsumen [18].

PLTS stand alone yang diusulkan dalam penelitian ini terdiri dari panel surya, solar charger, baterai dan inverter. PLTS stand alone harus bekerja dengan baik agar dapat menghasilkan daya listrik sesuai dengan kebutuhan. Oleh sebab itu PLTS perlu dikendalikan agar dapat beroperasi sesuai dengan yang diharapkan. Untuk meningkatkan kehandalan system kendali, dewasa ini telah berkembang system monitoring yang memungkinkan kita untuk memantau parameter yang dikendalikan [19] [20] [21]-[22]. Beberapa system monitoring yang telah diterapkan pada PLTS antara lain system monitoring berbasis Human Machine Interface (HMI) [23]-[24], Wireless [25]-[27], dan Internet of Things (IoT) [12], [15], [28]-[29]. HMI adalah salah satu peralatan yang banyak digunakan untuk berbagai aplikasi kendali dan monitoring, karena memiliki beberapa kelebihan, seperti dapat menampilkan data dalam berbagai bentuk baik angka, grafik atau gambar, dapat juga digunakan sebagai pusat pengendalian dan sebagainya [30]-[31]. Oleh sebab itu, system kendali dan monitoring PLTS yang diusulkan dalam penelitian ini dirancang dengan menggunakan HMI, sedangkan sebagai pusat pengontrolan dan pengolahan data dirancang dengan menggunakan PLC. Sistem kendali yang dirancang mencakup system kendali dan proteksi panel surya, pengisian dan pengosongan baterai dengan solar charger dan konversi tegangan panel surya dari DC ke AC menggunakan inverter. Parameter yang dimonitor mencakup tegangan dan arus panel surya, tegangan, arus dan SOC baterai serta tegangan dan arus inverter. Sistem kendali juga dilengkapi dengan system proteksi dengan menggunakan kontaktor magnetic yang dioperasikan dengan PLC dan HMI. Sistem kendali dan monitoring PLTS stand alone berbasis PLC dan HMI ini diharapkan dapat meningkatkan kehandalan PLTS dalam menyediakan energi listrik bagi konsumen.

METODE PENELITIAN

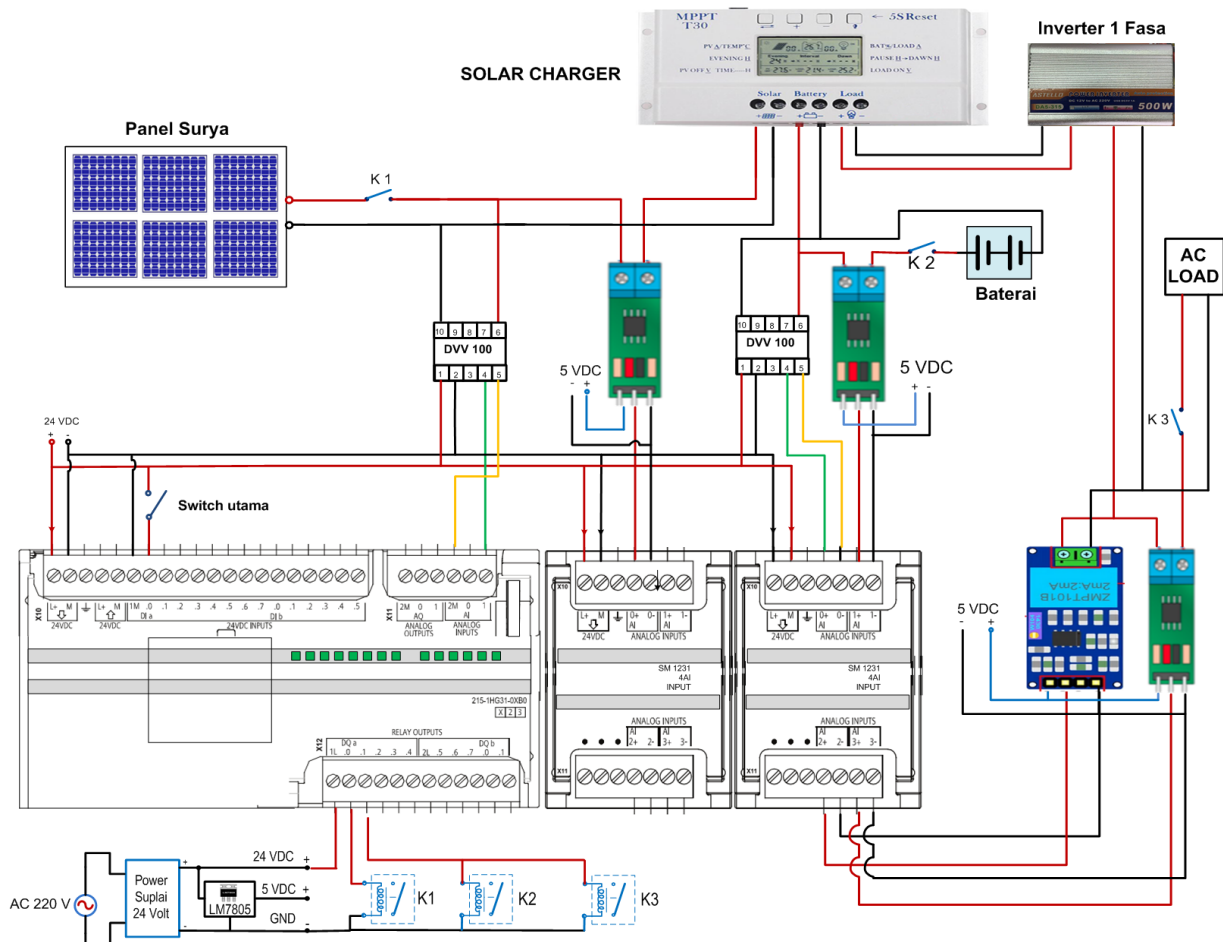
Penelitian system kendali dan monitoring PLTS stand alone berbasis PLC dan HMI ini dilakukan dalam bentuk eksperimen di laboratorium yang dimulai dari perancangan, perakitan alat, pengujian dan Analisa. dalam bentuk monitoring pembangkit listrik tenaga surya berbasis *Human Machine Interface*. Metode perancangan alat dilakukan dalam beberapa tahap yang terdiri dari perancangan perangkat keras dan perangkat lunak. Rancangan sistem kendali dan monitoring PLTS stand alone berbasis PLC dan HMI yang akan dibuat dalam penelitian ini ditunjukkan oleh blok diagram pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok diagram

Gambar 1 menunjukkan bahwa sistem kendali dan monitoring terdiri dari HMI TP 700 Basic PN, PLC S7 1200 DC/DC/Relay, panel surya, inverter, baterai, sensor tegangan, sensor arus, beban AC dan kontaktor. HMI digunakan untuk mengendalikan dan memonitoring PLTS stand alone, sedangkan PLC berfungsi sebagai pusat pengolahan data. Parameter PLTS yang dimonitor mencakup tegangan dan arus panel surya, tegangan dan arus serta State of Charge (SOC) baterai dan tegangan serta arus output inverter. Data setiap parameter diperoleh dari sensor. Pengendalian PLTS mencakup fungsi ON/OFF dan proteksi terhadap arus lebih. Fungsi ON/OFF panel surya, baterai dan beban beban AC dilakukan dengan menggunakan kontaktor yang dapat dioperasikan pada layar HMI. Proteksi arus lebih dilakukan juga dengan menggunakan kontaktor, dimana kontaktor akan memutuskan arus dari panel surya jika besaran arus yang dihasilkan dari sensor melebihi nilai arus setingnya. Begitu juga untuk proteksi baterai maupun proteksi beban AC.

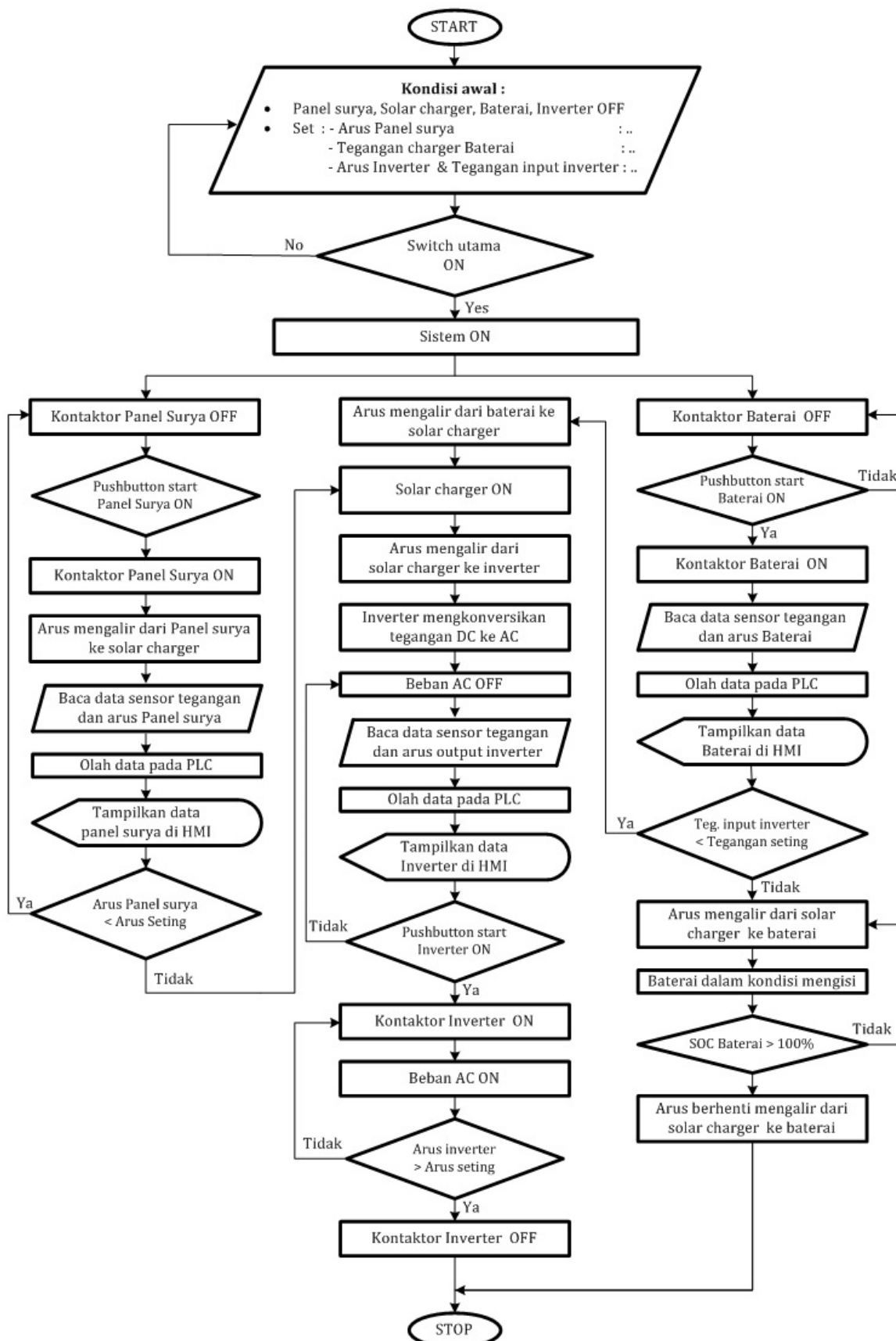
Panel surya yang digunakan adalah jenis polycrystalline dengan kapasitas 50 WP sebanyak delapan buah. Dalam pengujian, panel surya ini dihubungkan dalam bentuk rangkaian parallel. Untuk mendapatkan data arus panel surya, arus baterai dan arus output inverter digunakan sensor arus ACS712. Untuk mendapatkan data tegangan panel surya dan baterai digunakan sensor tegangan DC DVV 100, sedangkan untuk mendapatkan data tegangan output inverter digunakan sensor tegangan ZMPT101B. Kapasitas baterai atau SOC ditentukan berdasarkan nilai tegangan pada baterai tersebut. Untuk pengaturan tegangan charger baterai dan tegangan untuk input inverter digunakan solar charger yang sudah dilengkapi dengan system MPPT (Maximum Power Point Tracking) dengan kapasitas 30 Ampere. Baterai yang digunakan adalah baterai kering 12 Volt 12 Ah sebanyak dua buah yang dihubungkan secara parallel. Tegangan charger baterai ini diatur pada solar charger sebesar 13,5 Volt. Beban AC yang digunakan dalam pengujian berupa lampu pijar. PLC yang digunakan dilengkapi dengan dua modul analog input yang berfungsi sebagai terminal input dari semua sensor. Gambar 2 menunjukkan rangkaian hardware dari sistem kendali dan monitoring PLTS stand alone yang dibuat dalam penelitian ini.



Gambar 2. Skema rangkaian hardware sistem kendali dan monitoring PLTS stand alone

Gambar 2 menunjukkan bahwa input digital PLC berupa switch utama untuk mengaktifkan sistem kendali, sedangkan input analog pada modul analog berupa sinyal tegangan dan arus dari sensor. Untuk sensor tegangan DC DVV 100 akan menghasilkan sinyal analog berupa arus dengan rentang 4-20 mA, sensor tegangan ZMPT101B akan menghasilkan sinyal analog berupa tegangan 0-5 Volt, sedangkan sensor arus ACS712 akan menghasilkan sinyal analog berupa tegangan 0-5 Volt. Semua sinyal analog ini dapat diinputkan pada modul analog input PLC yang kapabel untuk sinyal tegangan dan arus. Dalam penelitian ini digunakan tiga terminal output PLC, yaitu untuk kontaktor 1 yang berfungsi untuk mengaktifkan rangkaian panel surya, kontaktor 2 untuk mengaktifkan rangkaian baterai dan kontaktor 3 untuk mengaktifkan rangkaian beban AC. Gambar 2 juga menunjukkan bahwa rangkaian juga dilengkapi dengan power supply untuk PLC dan HMI sebesar 24 VDC dan untuk sensor tegangan dan arus 5 VDC.

Prinsip kerja dari sistem kendali dan monitoring PLTS stand alone ini adalah sistem dapat diaktifkan melalui tombol pushbutton ON di layar HMI utama HMI. Setelah sistem aktif, maka rangkaian panel surya dapat diaktifkan melalui tombol ON panel surya yang ada di layer HMI. Ketika tombol panel surya sudah aktif, maka kontaktor 1 akan menghubungkan rangkaian panel surya dengan solar charger, sehingga arus akan mengalir ke solar charger. Kontaktor 1 juga berfungsi untuk melindungi panel surya dari arus lebih, dimana kontaktor 1 akan memutuskan aliran arus dari panel surya ke solar charger jika arus yang mengalir melebihi arus settingnya. Prinsip kerja sistem kendali dan monitoring PLTS stand alone berbasis HMI yang diusulkan dalam penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir yang ditunjukkan oleh Gambar 3 berikut.

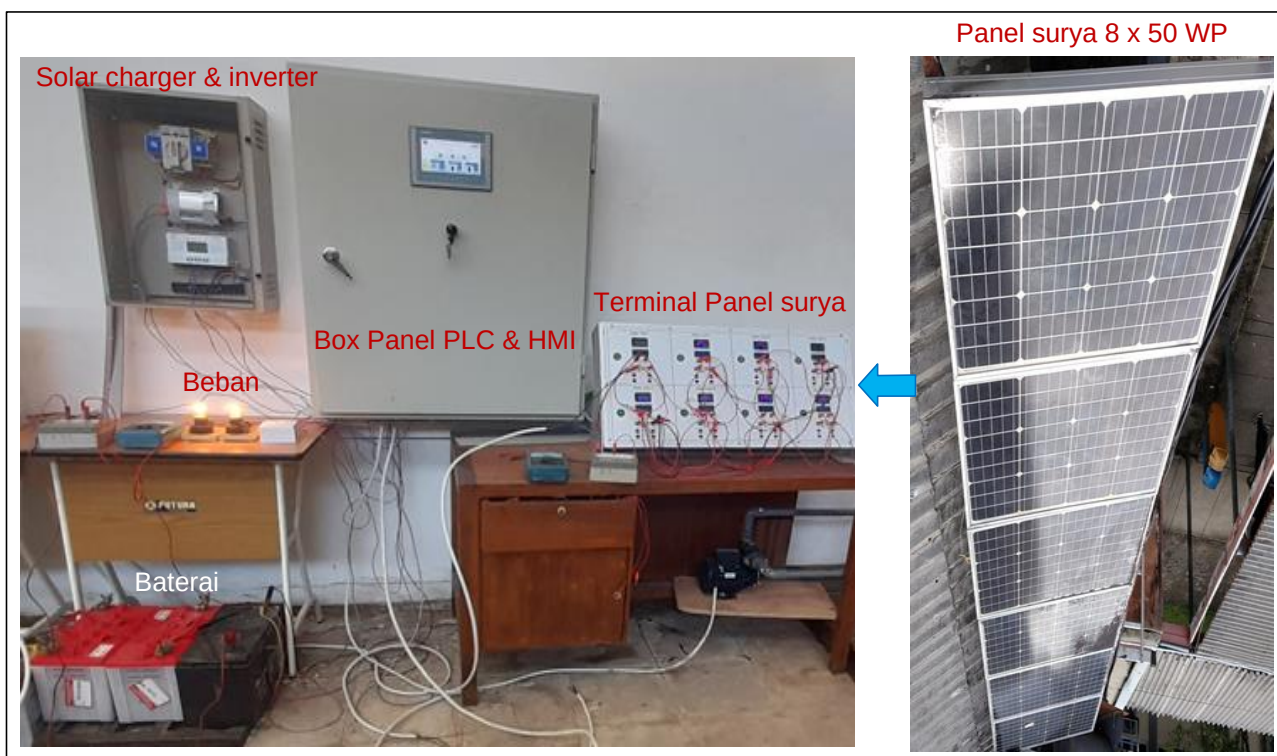


Gambar 3. Diagram alir sistem kendali dan monitoring PLTS stand alone

Pada solar charger terdapat dua terminal output, yaitu untuk baterai dan untuk inverter. Solar charger akan menghasilkan tegangan untuk charger baterai sesuai dengan tegangan settingnya, yaitu 13,5 Volt dan tegangan untuk input inverter sebesar 12 Volt. Arus akan mengalir ke baterai jika pushbutton ON baterai diaktifkan di layer HMI dengan kondisi tegangan panel surya lebih besar dari tegangan baterai dan SOC baterai di bawah 100%. Tegangan panel surya akan lebih besar dari tegangan baterai jika panel surya mendapatkan sinar cahaya pada siang hari. Sebaliknya pada malam hari, tegangan panel surya akan lebih rendah dari tegangan baterai. Pada kondisi ini arus akan mengalir dari baterai ke solar charger untuk menyuplai beban. Aliran arus ke baterai juga akan diputuskan oleh kontaktor 2 jika SOC baterai sudah 100%. Hal ini dilakukan untuk menghindari over charging pada baterai. Baterai ini juga diproteksi dari arus lebih, dimana kontaktor 2 akan memutuskan aliran arus ke baterai jika arus yang mengalir ke baterai melebihi arus settingnya.

Terminal output beban pada solar charger akan dihubungkan dengan terminal input inverter untuk mengkonversikan tegangan DC dari panel surya menjadi tegangan AC. Inverter yang digunakan adalah inverter 500 Watt dengan input 12 Volt DC dan output 220 Volt AC. Terminal output inverter akan dihubungkan dengan kontaktor 3 untuk mengaktifkan rangkaian beban AC. Pada rangkaian beban AC ini juga dilengkapi dengan sensor arus dan tegangan untuk mendapatkan data tegangan dan arus beban yang akan ditampilkan di layar HMI. Kontaktor 3 juga berfungsi untuk proteksi rangkaian beban AC dari arus lebih, dimana kontaktor 3 akan memutuskan aliran arus dari inverter ke beban jika arus yang mengalir melebihi nilai setting. Nilai setting arus panel surya, baterai dan inverter dapat diinputkan pada HMI.

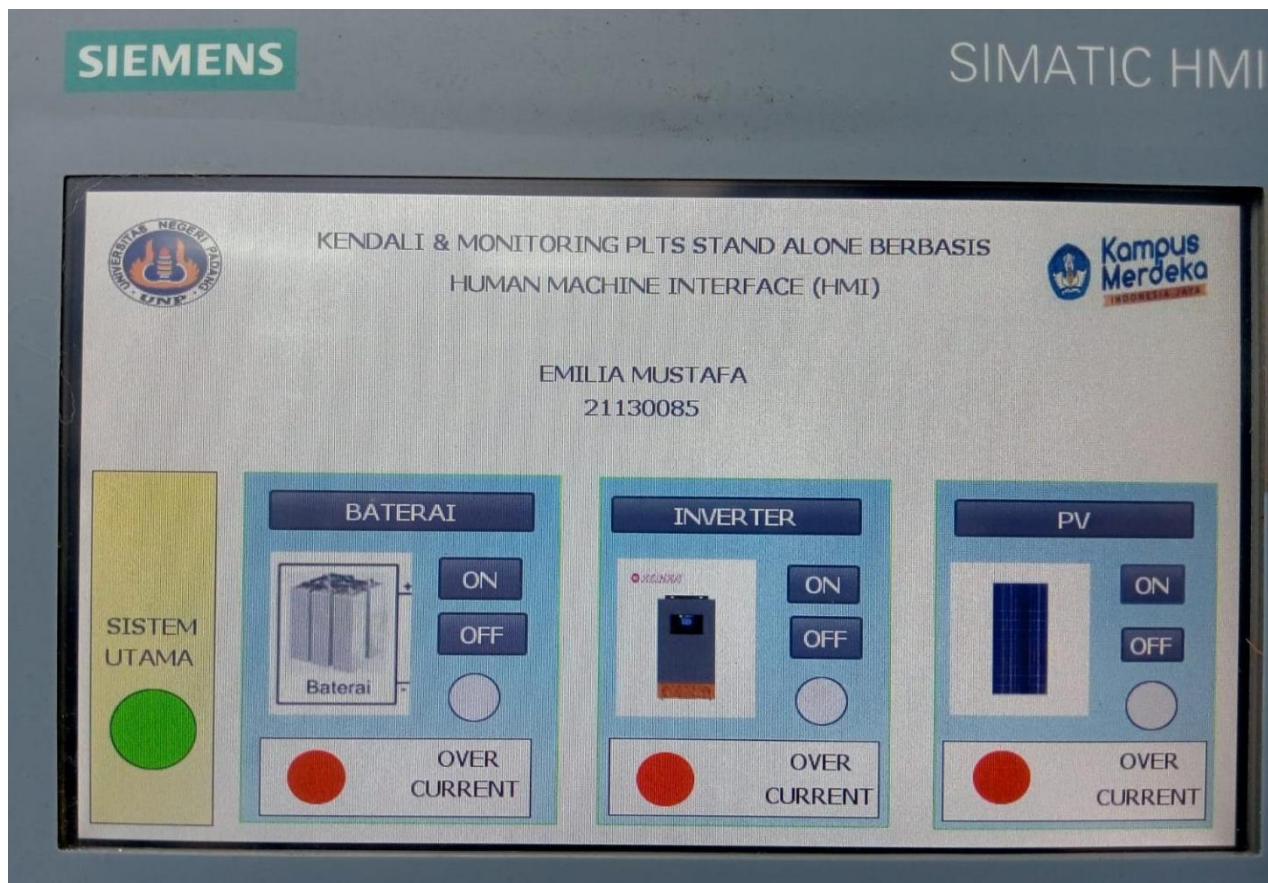
PLC dan HMI beserta sensor ditempatkan dalam satu panel ukuran 80 x 60 x 30 cm, sedangkan solar charger ditempatkan dalam panel lain ukuran 30 x 40 x 20 cm. HMI dan switch utama ditempatkan di bagian depan panel utama. Panel surya yang akan diuji dalam penelitian dipasang di atas atap laboratorium. PLC dan HMI yang digunakan dalam penelitian ini dihubungkan dengan kabel Profinet atau kabel LAN. PLC dan HMI deprogram dengan software TIA Portal V.17. Gambar 4 menunjukkan tata letak komponen system kendali dan monitoring PLTS stand alone yang dibuat dalam penelitian ini.



Gambar 4. Tata letak hardware pengujian

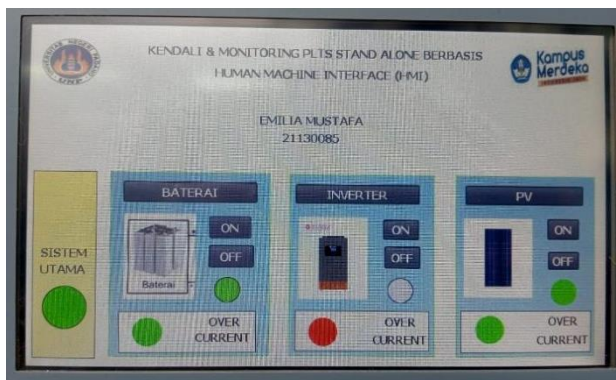
HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem kendali dan monitoring PLTS stand alone yang dibuat pada penelitian ini di uji di laboratorium. Pengujian alat dilakukan pada siang hari jam 12 WIB. Pengendalian dan monitoring dilakukan melalui layer HMI. Gambar 5 menunjukkan tampilan layer utama HMI, yang terdiri dari Judul, indicator system utama, bagian control baterai, inverter dan Panel surya (PV). Indikator sistem utama menunjukkan system sudah aktif atau belum, dimana pengaktifan sistem ini dapat dilakukan melalui switch utama yang ditempatkan di depan panel utama. Sistem kendali dan monitoring dikatakan aktif jika indicator system utama berwarna hijau, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.

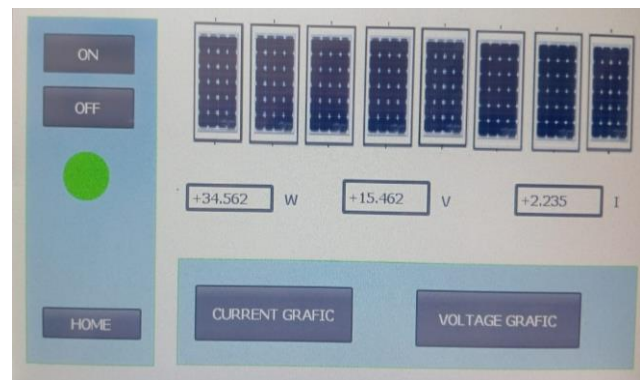


Gambar 5. Halaman utama HMI

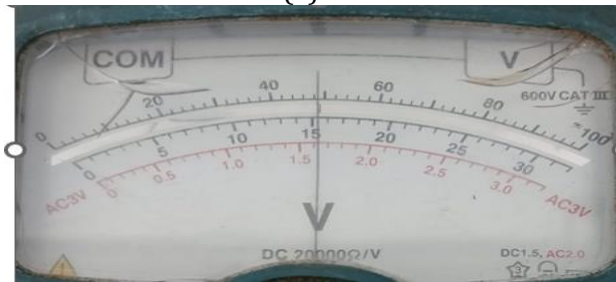
Pada bagian PV terdapat tombol ON, OFF untuk mengaktifkan rangkaian PV dan tombol PV untuk masuk ke halaman monitor parameter panel surya. Untuk mengaktifkan rangkaian panel surya dapat dilakukan dengan menekan tombol ON pada bagian PV. Rangkaian PV dalam kondisi ON ketika indikatornya berwarna hijau, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6(a) berikut. Rangkaian PV, baterai dan inverter baru bisa diaktifkan jika system utama sudah aktif. Gambar 6(b) menunjukkan halaman monitor panel surya pada layer HMI. Data pada halaman tersebut menunjukkan bahwa panel surya bekerja dengan daya 34,56 Watt, arus 2,2 Ampere dan tegangan 15,46 Volt. Nilai tegangan dan arus ini sudah sesuai dengan nilai yang terbaca pada alat ukur saat pengujian, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6(c) dan Gambar 6(d). Pada kondisi ini panel surya mengalirkan arus ke solar charger sebesar 2,2 Ampere dengan tegangan 15,46 Volt. Gambar 6(a) juga menunjukkan bahwa nilai arus yang mengalir ke solar charger masih di bawah nilai nominal arus hubung singkat, sehingga proteksi arus lebih panel surya tidak bekerja. Hal ini dapat dilihat dari indikator over current panel surya yang berwarna hijau. Arus yang mengalir ke solar charger dianggap melebihi nilai nominal jika indikator over current berwarna merah.



(a)



(b)



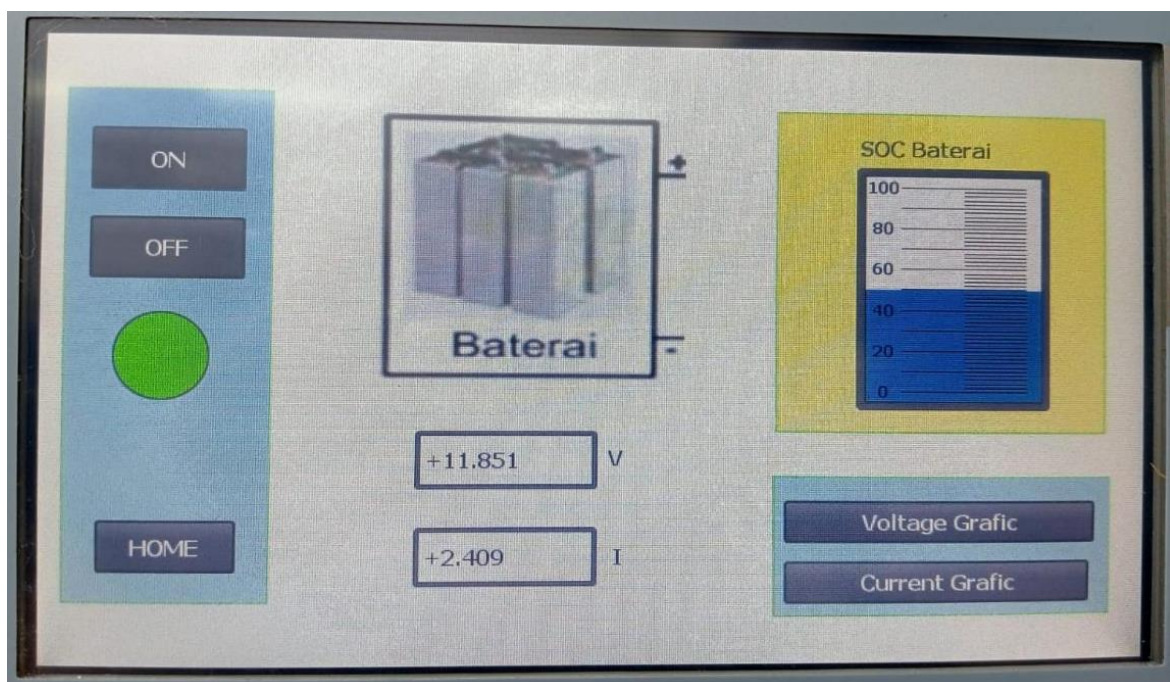
(c)



(d)

Gambar 6. Layar HMI untuk kendali dan monitoring panel surya. (a) Layar utama, (b) layar monitor panel surya, (c) Pembacaan voltmeter, (d) Pembacaan amperemeter

Gambar 7 menunjukkan layer HMI untuk monitor baterai. Pada saat pengujian tegangan baterai sekitar 11,8 Volt dengan aliran arus masuk baterai 2,4 Ampere. Gambar 7 juga menunjukkan bahwa SOC baterai berkisar 50% saat pengujian ini. Pada kondisi ini, arus mengalir dari solar charger ke baterai atau baterai dalam kondisi charging atau mengisi. Hal ini menunjukkan bahwa panel surya bekerja menyuplai beban dan juga menyuplai baterai. Kondisi ini bisa terjadi karena daya yang dibutuhkan beban lebih rendah dari daya yang dihasilkan panel surya serta kondisi baterai yang belum penuh.



Gambar 7. Layar HMI untuk kendali dan monitoring baterai

Gambar 8 menunjukkan layer HMI untuk kendali dan monitoring output inverter dan beban AC. Untuk mengaktifkan aliran arus dari output inverter ke beban, maka tombol ON pada bagian inverter di layer utama ditekan, sehingga indikatornya menjadi hijau, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 8(a). Selanjutnya untuk melihat parameter tegangan dan arus output inverter dapat dilakukan dengan menekan tombol inverter pada layer utama, sehingga muncul halaman monitoring inverter, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 8(b). Tegangan AC yang dihasilkan inverter adalah 235 Volt dengan arus sebesar 2,3 Ampere. Nilai tegangan ini sesuai dengan standar nilai tegangan AC 1 fasa yang digunakan untuk beban listrik 1 fasa. Pada pengujian ini, beban AC yang digunakan adalah dua buah lampu pijar yang dipasang secara paralel.



Gambar 8. Layer HMI untuk kendali dan monitoring inverter. (a) Layer utama, (b) layar monitor inverter

Semua hasil pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa system kendali dan monitoring PLTS stand alone berbasis HMI telah bekerja dengan baik sesuai dengan yang direncanakan. Sistem kendali yang dipusatkan di HMI telah mampu mengendalikan PLTS secara terintegrasi dengan yang direncanakan. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa HMI juga telah sukses menampilkan data-data dari parameter PLTS stand alone yang dimonitor secara real time dengan nilai yang sesuai dengan nilai yang terbaca pada alat ukur.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengusulkan system kendali dan monitoring PLTS stand alone berbasis PLC dan HMI yang diterapkan pada delapan buah panel surya 50 WP yang dihubungkan secara paralel. PLTS stand alone ini dilengkapi dengan solar charger, inverter 1 fasa 500 watt dan dua buah baterai 12 Volt 12 Ah. Pengujian dilakukan dengan menggunakan beban AC berupa lampu pijar. Hasil pengujian menunjukkan bahwa system kendali dan monitoring PLTS yang diusulkan dalam penelitian ini telah bekerja dengan baik. HMI telah sukses mengendalikan PLTS dan memonitor parameter-parameter PLTS secara realtime dengan nilai yang sesuai dengan nilai yang terbaca pada alat ukur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Dhimish, P. Mather, and V. Holmes, "Evaluating Power Loss and Performance Ratio of Hot-Spotted Photovoltaic Modules," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 65, no. 12, pp. 5419–5427, 2018, doi: 10.1109/TED.2018.2877806.
- [2] M. Yuhendri and G. S. Putra, "Implementasi Sistem Kendali MPPT Panel Surya Berbasis Algoritma Incremental Conductance," *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 1, no. 2, pp. 218–223, 2020, doi: 10.24036/jtein.v1i2.72.
- [3] B. Taghezouit, F. Harrou, Y. Sun, A. H. Arab, and C. Larbes, "Multivariate statistical monitoring of photovoltaic plant operation," *Energy Convers. Manag.*, vol. 205, no. August 2019, p. 112317, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112317.
- [4] N. M. Martins Da Rocha, L. Lapolli Brighenti, J. Cesar Passos, and D. Cruz Martins, "Photovoltaic Cell Cooling

- as a Facilitator for MPPT," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 17, no. 10, pp. 1569–1577, 2019, doi: 10.1109/TLA.2019.8986434.
- [5] H. D. Tafti, C. D. Townsend, G. Konstantinou, and J. Pou, "A Multi-Mode Flexible Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Power Plants," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 6, pp. 5038–5042, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2883320.
- [6] R. Fernandes and M. Yuhendri, "Implementasi Solar Tracker Tanpa Sensor pada Panel Surya," *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 6, no. 2, pp. 337–343, 2020.
- [7] H. Masrepol and M. Yuhendri, "Implementasi MPPT Panel Surya Berbasis Algoritma Perturbasi & Observasi (PO) Menggunakan Arduino," *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 2, no. 2, pp. 162–167, 2021, doi: 10.24036/jtein.v2i2.155.
- [8] P. Narkwatchara, C. Ratanatamskul, and A. Chandrachai, "Effects of particulate matters and climate condition on photovoltaic system efficiency in tropical climate region," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 2577–2586, 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2020.09.016.
- [9] S. Dorji, D. Wangchuk, T. Choden, and T. Tshewang, "Maximum power point tracking of solar photovoltaic cell using perturb observe and fuzzy logic controller algorithm for boost converter and quadratic boost converter," *Mater. Today Proc.*, vol. 27, no. xxxx, pp. 1224–1229, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.144.
- [10] W. Qu, X. Xing, Y. Cao, T. Liu, H. Hong, and H. Jin, "A concentrating solar power system integrated photovoltaic and mid-temperature solar thermochemical processes," *Appl. Energy*, vol. 262, no. December 2019, p. 114421, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114421.
- [11] H. A. Sher, A. A. Rizvi, K. E. Addoweesh, and K. Al-Haddad, "A Single-Stage Stand-Alone Photovoltaic Energy System With High Tracking Efficiency," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 755–762, 2017, doi: 10.1109/TSTE.2016.2616443.
- [12] A. Lopez-Vargas, M. Fuentes, and M. Vivar, "IoT Application for Real-Time Monitoring of Solar Home Systems Based on Arduino™ with 3G Connectivity," *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 2, pp. 679–691, 2019, doi: 10.1109/JSEN.2018.2876635.
- [13] L. Hernández-Callejo, S. Gallardo-Saavedra, and V. Alonso-Gómez, "A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance," *Sol. Energy*, vol. 188, no. June, pp. 426–440, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.06.017.
- [14] A. Ahmad and J. Yusuf Khan, "Roof-Top Stand-Alone PV Micro-Grid: A Joint Real-Time BES Management, Load Scheduling and Energy Procurement from a Peaker Generator," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 4, pp. 3895–3909, 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2842757.
- [15] C. Zedak, A. Belfqih, A. Lekbich, J. Boukherouaa, and A. Laamimi, "Implementation of an Intelligent System for Remote Control of Decentralized photovoltaic Sources using the Internet of Things Infrastructure," *Proc. 2019 7th Int. Renew. Sustain. Energy Conf. IRSEC 2019*, 2019, doi: 10.1109/IRSEC48032.2019.9078247.
- [16] C. Li, "Unstable Operation of Photovoltaic Inverter from Field Experiences," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, no. 2, pp. 1013–1015, 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2017.2656020.
- [17] A. Lindo and M. Yuhendri, "Sistem Kendali Daya Maksimum Panel Surya Berbasis Fuzzy Logic Controller," *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 3, no. 1, pp. 102–110, 2022, doi: 10.24036/jtein.v3i1.207.
- [18] M. B. Satti and A. Hasan, "Direct Model Predictive Control of Novel H-Bridge Multilevel Inverter Based Grid-Connected Photovoltaic System," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 62750–62758, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2916195.
- [19] C. F. Abe, J. B. Dias, G. Notton, and P. Poggi, "Computing Solar Irradiance and Average Temperature of Photovoltaic Modules from the Maximum Power Point Coordinates," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 10, no. 2, pp. 655–663, 2020, doi: 10.1109/JPHOTOV.2020.2966362.
- [20] I. Celik *et al.*, "Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of perovskite tandem photovoltaic solar cells," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 8, no. 1, pp. 305–309, 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2768961.
- [21] Y. Hishikawa *et al.*, "Voltage-dependent temperature coefficient of the I-V curves of crystalline silicon photovoltaic modules," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 8, no. 1, pp. 48–53, 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2766529.
- [22] W. Yu, G. Liu, L. Zhu, and W. Yu, "Convolutional neural network with feature reconstruction for monitoring mismatched photovoltaic systems," *Sol. Energy*, vol. 212, no. September, pp. 169–177, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.09.026.
- [23] F. Azizah and M. Yuhendri, "Solar Panel Monitoring and Control System Using Human Machine Interface," *Andalasian Int. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 03, pp. 149–158, 2022, doi: 10.25077/aijaset.v2i03.64.
- [24] C. M. Vinga, F. Demeter, V. Vatau, F. M. Frigura-Iliasa, M. Mirica, and M. Iorga, "Human Machine Interface for a Photovoltaic Electricity Station," *Proc. Int. Conf. Inf. Digit. Technol. 2019, IDT 2019*, pp. 532–535, 2019, doi:

-
- 10.1109/DT.2019.8813435.
- [25] T. Hu, M. Zheng, J. Tan, L. Zhu, and W. Miao, "Intelligent photovoltaic monitoring based on solar irradiance big data and wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 35, pp. 127–136, 2015, doi: 10.1016/j.adhoc.2015.07.004.
- [26] E. Kabalci and Y. Kabalci, "A wireless metering and monitoring system for solar string inverters," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 96, no. July 2017, pp. 282–295, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.10.013.
- [27] M. E. Andreoni López, F. J. Galdeano Mantiñan, and M. G. Molina, "Implementation of wireless remote monitoring and control of solar photovoltaic (PV) system," *Proc. 2012 6th IEEE/PES Transm. Distrib. Lat. Am. Conf. Expo. T D-LA 2012*, pp. 1–6, 2012, doi: 10.1109/TDC-LA.2012.6319050.
- [28] A. Triki-Lahiani, A. Bennani-Ben Abdelghani, and I. Slama-Belkhodja, "Fault detection and monitoring systems for photovoltaic installations: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. March, pp. 2680–2692, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.101.
- [29] Y. Li *et al.*, "On-line Monitoring System Based on Open Source Platform for Photovoltaic Array," *Energy Procedia*, vol. 145, pp. 427–433, 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.04.070.
- [30] I. Rifaldo and M. Yuhendri, "Sistem Monitoring Kecepatan Motor Induksi dengan HMI Berbasis PLC," *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 3, no. 2, pp. 319–325, 2022.
- [31] T. Ardiansyah and D. Risfendra, "Rancangan Sistem Mounting Device Berbasis PLC Menggunakan HMI," 2020.